

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Faculta de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia

“CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE
ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS
MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES
APLICADOS EN EL PROYECTO
PLANTA DE BOMBEO
OJO COPAPUJO”

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. Miguel Sergio Chique Sayre

Para optar el título profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO – GEOTÉCNICO

TACNA - PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Faculta de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia

HOJA DE JURADO

TESIS


“CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE
ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL
DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO
PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO”

Presentado por el bachiller Miguel Sergio Chique Sayre
Tesis sustentada y aprobada el 5 de noviembre del 2021, con el siguiente jurado

Presidente

: 
MSc. CONRADO GABINO BEDOYA JAÉN

Miembro – Secretario

: 
Mgr. FREDY CLETO CABRERA OLIVERA

Miembro

: 
Dr. MARIO DAVID HUAMÁN RODRIGO

Asesor de Tesis

: 
Ing. JORGE PANTALEÓN BARRIGA GAMARRA

DEDICATORIA

“A la memoria de mi madre por su gran apoyo incondicional en todo momento, a mi esposa Nilda por su apoyo y comprensión, a mi padre y hermanos por confiar en mí”

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a Dios por ser parte esencial en mi vida y luz en mi camino. A mi madre Marlene (q.e.p.d.) por darme la vida y su gran apoyo durante mi carrera. A mi esposa Nilda por ser mi motivo de superación profesional y personal. Al ingeniero Vianney Torres por su apoyo en la realización del presente trabajo de tesis. Al ingeniero Jorge Barriga por sus grandes consejos para la mejora del presente trabajo.

Muchas gracias a todos.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	
ASPECTOS GENERALES.....	3
1.1. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD DEL ÁREA DE ESTUDIO	3
1.2. CLIMA.....	4
1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	4
1.3.1. Planteamiento del problema.....	4
1.3.2. Formulación del problema.....	5
1.3.2.1. Problema general.....	5
1.3.2.2. Problemas específicos	5
1.3.3. Objetivos.....	6
1.3.3.1. Objetivo general.....	6
1.3.3.2. Objetivos específicos	6

1.3.4.	Hipótesis	6
--------	-----------------	---

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.....	7
---------------------------	----------

2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	7
------	--	---

2.2.	TIPOS DE ONDAS SÍSMICAS.....	8
------	------------------------------	---

2.2.1.	Ondas corpóreas.....	8
--------	----------------------	---

2.2.2.	Ondas Superficiales.....	9
--------	--------------------------	---

2.3.	MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA	10
------	------------------------------------	----

2.4.	MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES.....	14
------	---	----

2.5.	CONSTANTES ELÁSTICAS	21
------	----------------------------	----

2.5.1.	Relación de Poisson (ν).....	21
--------	------------------------------------	----

2.5.2.	Módulo de cizalla o rigidez (G_{max}).....	22
--------	--	----

2.5.3.	Módulo elástico o Young (E_{max}).....	23
--------	--	----

2.5.4.	Densidad.....	23
--------	---------------	----

2.6.	CAPACIDAD PORTANTE POR LA METODOLOGÍA DE TEZCAN..	24
------	---	----

2.7.	CORRELACIONES CON VS APLICADOS AL ANÁLISIS GEOTÉCNICO	25
------	---	----

2.7.1.	Relación de las Vs y el ensayo de penetración estándar SPT.....	25
--------	---	----

2.7.2.	Relación del NSPT y la densidad relativa (D_r).....	26
--------	---	----

2.7.3.	Relación entre el ángulo de fricción y la densidad relativa	29
--------	---	----

2.8.	CÁLCULO DE ASENTAMIENTO EN SUELOS GRANULARES.....	30
------	---	----

2.9.	MODELAMIENTO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO	32
2.9.1.	Limitaciones de un modelo geológico y geotécnico.....	33
2.9.2.	Modelamiento implícito	33
2.9.3.	Modelo de bloques.....	34
2.9.4.	Interpolación mediante Distancia Inversa Ponderada.....	35

CAPÍTULO III

MARCO GEOLÓGICO	38	
3.1.	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL.....	38
3.2.	GEOLOGÍA REGIONAL.....	38
3.2.1.	Estructuras o Fallas	40
3.3.	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	42
3.4.	GEOLOGÍA LOCAL	42
3.4.1.	Depósitos fluvioglaciares.....	42
3.4.2.	Depósitos piroclásticos de toba dacítica.....	43
3.4.3.	Depósitos aluviales	44

CAPÍTULO IV

ESTUDIO DE PROSPECCIÓN SÍSMICA Y MECÁNICA DE SUELOS	47	
4.1.	GENERALIDADES.....	47
4.1.1.	Materiales y equipos	47
4.2.	ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA.....	48
4.2.1.	Adquisición de datos	48
4.2.2.	Procesamiento de datos.....	49
4.2.2.1.	Selección de primeras llegadas.....	50

4.2.2.2.	Inversión sísmica bajo la modalidad de tomografía sísmica	51
4.3.	ENSAYOS DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES	53
4.3.1.	Adquisición de datos	53
4.3.2.	Procesamiento de datos.....	54
4.4.	REGISTRO DE CALICATAS Y MECÁNICA DE SUELOS.....	56
4.4.1.	Trabajo de Laboratorio.....	59
4.5.	PROCESAMIENTO DE DATOS E INTERPRETACIÓN	59
4.5.1.	Tratamiento de la información de campo	59
4.5.2.	Interpretación geológica y geofísica	61

CAPÍTULO V

	MODELAMIENTO Y ANÁLISIS GEOTÉCNICO.....	65
5.1.	MODELAMIENTO	65
5.1.1.	Modelamiento geológico	65
5.1.2.	Interpolación 3D de datos geofísicos.....	66
5.1.3.	Modelo integrado de bloques	67
5.2.	CÁLCULO DE PARÁMETROS ELÁSTICO DINÁMICOS, DENSIDAD RELATIVA Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EMPÍRICO	67
5.3.	ANÁLISIS GEOTÉCNICO	71
5.3.1.	Esquema de la cimentación de la estación de bombeo y máquinas .	71
5.3.2.	Cálculo de la capacidad portante	73
5.3.3.	Cálculo de asentamientos	75

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS	76
6.1. RESULTADOS DE LA PROSPECCIÓN SÍSMICA.....	76
6.2. MODELO GEOLÓGICO, MODELO GEOFÍSICO Y MODELO DE BLOQUES.....	81
6.3. RESULTADOS DE PARÁMETROS ELÁSTICO DINÁMICOS, DENSIDAD RELATIVA Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EMPÍRICO	88
6.4. ESTIMACIÓN DE CARGAS TRANSMITIDAS POR LA PLANTA DE BOMBEO.....	93
6.5. RESULTADOS DE LA CAPACIDAD PORTANTE.....	93
6.6. ASENTAMIENTOS ESTIMADOS.....	95
CONCLUSIONES.....	98
RECOMENDACIONES.....	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Plano de ubicación de la zona de estudio.</i>	3
Figura 2: <i>Modelo de propagación de ondas P y S.</i>	9
Figura 3: <i>Modelo de propagación de ondas R y L.</i>	10
Figura 4: <i>Diagrama esquemático con las trayectorias de onda de interés en el método de refracción sísmica y sus componentes básicos.</i>	11
Figura 5: <i>Modelo de dos capas.</i>	12
Figura 6: <i>Propagación de las ondas en un medio de 2 capas.</i>	12
Figura 7: <i>Refracción al medio suprayacente con ángulo crítico i_c.</i>	13
Figura 8: <i>Curva distancia-tiempo.</i>	14
Figura 9: <i>Dispersión de ondas Rayleigh.</i>	16
Figura 10: <i>Dispersión geométrica en un medio estratificado, representa el desplazamiento en profundidad de dos frecuencias diferentes.</i>	18
Figura 11: <i>Esquema para el estudio de MASW en campo.</i>	19
Figura 12: <i>Condiciones típicas del terreno favorables y desfavorables para el MASW.</i>	20
Figura 13: <i>Reducción del módulo cortante G contra deformación angular.</i>	23
Figura 14: <i>Relación D_r y NSPT.</i>	27
Figura 15: <i>Cálculo de asentamiento elástico usando factor de influencia de la deformación unitaria.</i>	32

Figura 16: <i>Generación de superficies de contacto mediante modelamiento implícito.</i>	34
Figura 17: <i>Modelo de bloques y la importancia del tamaño del bloque para representar los contactos.</i>	35
Figura 18: <i>Esquema de la interpolación por Inverso de la Distancia Ponderada (IDW).</i>	37
Figura 19: <i>Columna estratigráfica a nivel regional</i>	40
Figura 20: <i>Plano geológico regional.</i>	41
Figura 21: <i>Excavación hecha en el área de estudio. Muestra el nivel freático, las arenas aluviales y las arenas gravosas fluvio-glaciares a 2.9m.</i>	43
Figura 22: <i>Tobas dacíticas en el área de estudio.</i>	44
Figura 23: <i>Arenas aluviales y área tentativa donde se emplazará la plana de bombeo.</i>	45
Figura 24: <i>Plano geológico local del área de estudio.</i>	46
Figura 25: <i>Adquisición de datos por refracción sísmica.</i>	49
Figura 28: <i>Selección de primeras llegadas del perfil sísmico (color rojo).</i>	50
Figura 29: <i>Gráfico de primeras llegadas de una línea de refracción sísmica.</i>	51
Figura 30: <i>A) Modelo de capas. B) Modelo de tomografía sísmica.</i>	52
Figura 26: <i>Adquisición de datos por MASW.</i>	54
Figura 31: <i>Análisis espectral de registros sísmicos y selección de curva de dispersión de ondas Rayleigh.</i>	55
Figura 32: <i>Modelamiento de las velocidades Vs.</i>	56
Figura 27: <i>A) Registro de la excavación C-50. B) Registro de la calicata C-51.</i> 58	

Figura 33: <i>Base de datos con formato de sondaje para los geófonos y calicatas.</i>	60
Figura 34: <i>Visualización 3D del cartografiado geológico, geofísica y calicatas.</i>	61
Figura 35: <i>Ubicación de las secciones mayores interpretadas.</i>	63
Figura 36: <i>Sección de interpretación geológica con escala vertical exagerada y datos de refracción sísmica y MASW.</i>	64
Figura 37: <i>Sólidos litológicos creados por modelamiento implícito y pseudosondajes con datos categóricos de estratos.</i>	65
Figura 38: <i>Isosuperficies generadas por la interpolación de las Vp.</i>	66
Figura 39: <i>A) Modelo de bloques categorizado por estratos. B) Modelo de bloques para la interpolación de Vp.</i>	67
Figura 40: <i>Hoja de cálculo para los parámetros elásticos de cada bloque.</i>	68
Figura 41: <i>Comparación de resultados de laboratorio y correlaciones empíricas.</i>	69
Figura 42: <i>Comparación de resultados para las correlaciones de densidad relativa y ángulo de fricción.</i>	70
Figura 43: <i>Esquema de la propuesta para la cimentación tipo bloque y zapatas. Sin exageración vertical.</i>	72
Figura 44: <i>Esquema de la propuesta para la cimentación tipo pórtico y losa de cimentación. Sin exageración vertical.</i>	73
Figura 45: <i>Comparación entre los métodos de cálculo clásicos y de Tezcan para la capacidad portante del suelo con diferentes anchos de cimentación para la arena aluvial seca.</i>	74

Figura 46: <i>Sección correspondiente a la tomografía sísmica de la línea RS07.</i>	76
Figura 47: <i>Sección correspondiente a la tomografía sísmica de la línea RS10.</i>	77
Figura 48: <i>Sección correspondiente a la tomografía sísmica de la línea RS01.</i>	78
Figura 49: <i>Distribución de las velocidades Vs según su cota para cada ensayo MASW.</i>	80
Figura 50: <i>Sección AA' del sector sur y ensayos geofísicos en el área de estudio.</i>	82
Figura 51: <i>Sección DD' del sector norte y ensayos geofísicos en el área de estudio.</i>	82
Figura 52: <i>Interpolación de las Vs en la cota 4219.</i>	83
Figura 53: <i>Modelo de bloques categorizado por estratos.</i>	84
Figura 54: <i>Modelo de bloques de la interpolación de las Vp.</i>	86
Figura 55: <i>Modelo de bloques de la interpolación de las Vs.</i>	86
Figura 56: <i>Secciones longitudinales del área de evaluación con los resultados de los parámetros considerados. A) Densidad. B) Coeficiente de Poisson. C) Módulo de Elasticidad. D) Módulo de Corte. E) Densidad Relativa. F) Ángulo de Fricción.</i>	92
Figura 57: <i>Tipos de cimentación con factor de influencia semiempírico. A) Losa de cimentación. B) Zapata. C) Bloque rígido.</i>	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Tabla de parámetros recomendados para la adquisición de registros MASW.</i>	21
Tabla 2: <i>Factor de seguridad n para suelos y rocas</i>	25
Tabla 3: <i>Correlaciones entre V_s y NSPT</i>	26
Tabla 4: <i>Relación entre NSPT y D_r según Terzaghi y Peck (1948)</i>	27
Tabla 5: <i>Relación entre NSPT y D_r modificado por Skempton (1986).</i>	28
Tabla 6: <i>Relación entre el ángulo de fricción interna y la densidad relativa por diversos autores.</i>	29
Tabla 7: <i>Valores típicos del ángulo de fricción.</i>	30
Tabla 8: <i>Datos de ubicación de las líneas de refracción sísmica.</i>	48
Tabla 9: <i>Coordenadas de los ensayos MASW.</i>	53
Tabla 10: <i>Coordenadas de calicatas.</i>	59
Tabla 11: <i>Rango usual de velocidades para los materiales geológicos.</i>	62
Tabla 12: <i>Correlación de Velocidad de ondas P y tipo de suelo, según ASTM D 5777-95</i>	62
Tabla 13: <i>Correlación de Velocidad de ondas P y tipo de suelo, según ASTM D 5777-95.</i>	63
Tabla 14: <i>Valores típicos de V_s para perfiles de suelo.</i>	64
Tabla 15: <i>Comparación de correlaciones empíricas y ensayos para la densidad y densidad relativa.</i>	69
Tabla 16: <i>Capas determinadas por la refracción sísmica.</i>	76

Tabla 17: <i>Valores mínimos y máximos de Vp en cada línea sísmica.....</i>	79
Tabla 18: <i>Valores mínimos y máximos de las Vs en los ensayos MASW.....</i>	79
Tabla 19: <i>Capas determinadas por el MASW.....</i>	81
Tabla 20: <i>Resumen de Vp y Vs por estrato.....</i>	85
Tabla 21: <i>Variabilidad de la interpolación de Vp y Vs por estrato.....</i>	87
Tabla 22: <i>Variabilidad de las Vp y Vs por estrato y cota de elevación.....</i>	88
Tabla 23: <i>Resumen de resultados de los parámetros para la caracterización geotécnica por estrato.....</i>	89
Tabla 24: <i>Resumen de resultados de los parámetros para la caracterización geotécnica por estrato y cota de elevación.....</i>	90
Tabla 25: <i>Resultados de las cargas transmitidas por las cimentaciones.....</i>	93
Tabla 26: <i>Cálculo de la carga admisible para zapatas individuales de 1.5x1.5 m.....</i>	94
Tabla 27: <i>Cálculo de la carga admisible para la cimentación tipo bloque 4.1x5.3 m.....</i>	94
Tabla 28: <i>Cálculo de la carga admisible para la cimentación tipo pórtico o losa de cimentación.....</i>	95
Tabla 29: <i>Asentamientos calculados para cada tipo de cimentación.....</i>	97

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: PLANOS INICIALES.....	107
ANEXO 2: PROSPECCIÓN SÍSMICA.....	111
ANEXO 3: ENSAYOS DE MECÁNICA DE SUELOS C-50 Y C-51.....	133
ANEXO 4: INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA E INTERPOLACIÓN DE V_p Y V_s.....	138
ANEXO 5: CÁLCULO DE PARÁMETROS ELÁSTICOS Y OTRAS CORRELACIONES CON V_s.....	152

RESUMEN

Este proyecto trata de la caracterización geotécnica del área de emplazamiento para la planta de bombeo Ojo Copapujo en el distrito de Tarata, aplicando ensayos de refracción sísmica y MASW. Actualmente este último es muy aplicado en el campo de la geotecnia debido a su versatilidad, ventajas logísticas y de costo.

La interpretación de estos ensayos nos permitió crear el modelo implícito 3D de los estratos de depósitos aluviales, piroclásticos y fluvioglaciares. La caracterización geotécnica se realizó al integrar parámetros elástico dinámicos, los cuales están correlacionados con las velocidades de ondas de compresión (P) y de corte (S). También se calculó por el método de Tezcan las capacidades portantes, este método resultó ser más conservador que los tradicionales.

Se caracterizó a los depósitos aluviales, como suelos blandos de compacidad suelta y con una capacidad portante baja, recomendando no emplazar alguna estructura en este estrato. Los depósitos fluvioglaciares, como suelos de compacidad compacta a densa y una capacidad portante moderada que es afectada por el nivel freático. Bajo estas condiciones y la estimación de asentamientos admisibles se determina que debe aplicarse una losa de cimentación y en la profundidad de la cota 4220 donde se proyecta la cimentación. Las arenas fluvioglaciares por su estado de compactación no son licuables.

Palabras clave: Modelamiento implícito, velocidad de ondas de corte, MASW, parámetros elástico dinámicos.

ABSTRACT

This project deals with the geotechnical characterization of the site area for the Ojo Copapujo pumping plant in the district of Tarata, applying seismic refraction and MASW tests. Currently the latter is widely applied in the geotechnical field due to its versatility, logistical and cost advantages.

The interpretation of these tests allowed us to create the implicit 3D model of the alluvial, pyroclastic and fluvio-glacial deposit strata. The geotechnical characterization was performed by integrating dynamic elastic parameters, which are correlated with compressional (P) and shear (S) wave velocities. The bearing capacities were also calculated by Tezcan's method, which proved to be more conservative than the traditional methods.

The alluvial deposits were characterized as soft soils of loose compactness and with a low bearing capacity, recommending not to place any structure in this stratum. The fluvio-glacial deposits were characterized as compact to dense soils with a moderate bearing capacity that is affected by the water table. Under these conditions and the estimation of admissible settlements, it is determined that a foundation slab must be applied and at the depth of 4220 where the foundation is projected. The fluvio-glacial sands are not liquefiable due to their compaction state.

Keywords: Implicit modeling, shear wave velocity, MASW, elastic dynamic parameters.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las características geotécnicas es importante para la evaluación del emplazamiento y diseño de estructuras. Para describir y cuantificar estas características se puede recurrir a métodos directos e indirectos, siendo un ejemplo de esta última los métodos geofísicos que se aplicaron en este trabajo.

Es importante mencionar que las características geotécnicas de rocas y suelos están ligadas a la geología, la génesis y su composición, por lo que entender el origen de estos es uno de los primeros aspectos que se deben conocer en un proyecto o estudio geotécnico.

En el presente trabajo de tesis junto a los puntos antes mencionados, ahondaremos también en el aprovechamiento de los datos obtenidos en campo, es decir, el procesamiento eficiente de la información para la obtención de resultados, lo cual se reflejó en la construcción de un modelo geológico que junto a la adición de parámetros elásticos y de resistencia se convierte en un modelo geotécnico que nos permitió evaluar el emplazamiento de la planta de bombeo Ojo Copapujo.

La presente tesis consta de 6 capítulos, las cuales se resumen a continuación.

El Capítulo I, se denomina Aspectos Generales donde se puede apreciar los datos del proyecto como su accesibilidad, clima, el planteamiento del problema, los objetivos e hipótesis.

El Capítulo II, comprendida por el Marco Teórico, que trata de los conceptos y definiciones relacionados a la caracterización geotécnica y prospección sísmica.

El Capítulo III, comprendido por el Marco Geológico, que trata de la descripción geológica regional y local del área de estudio.

El Capítulo IV, denominado Estudio de Prospección Sísmica y Mecánica de Suelos, donde detallamos los trabajos de campo para la obtención de información y su procesamiento.

El Capítulo V, denominado Modelamiento y Análisis Geotécnico, donde detallamos el procedimiento que se siguió para la creación del modelo 3D geológico, geotécnico y bloques para la evaluación geotécnica.

El Capítulo VI, donde se muestra la Discusión de Resultados obtenidos.

CAPÍTULO I

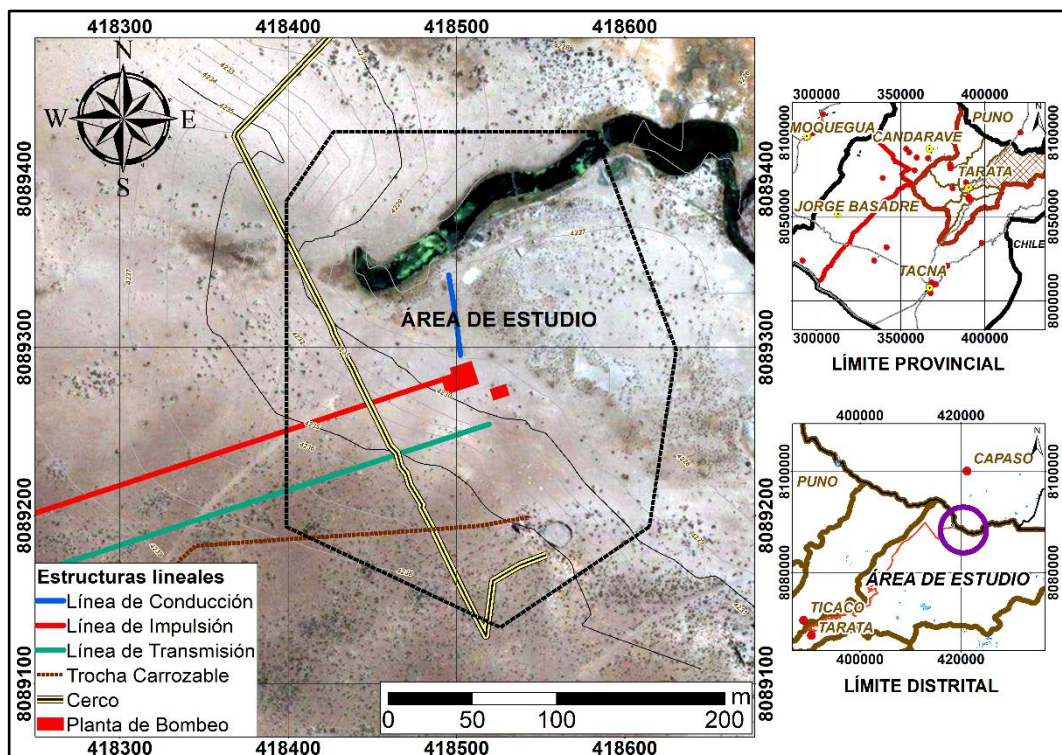
ASPECTOS GENERALES

1.1. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en la región Tacna, provincia de Tarata, distrito de Tarata a 500 m del límite con la región Puno; se encuentra en el área de influencia de las comunidades campesinas de Kallapuma y Mamuta. Tiene como coordenada central UTM WGS84, 418 442 E y 8 089 287 N.

Figura 1

Plano de ubicación de la zona de estudio, elaborado con el sistema de coordenadas UTM WGS84



El acceso a la zona de estudio es a través de la carretera asfaltada Tacna-Tarata de 77 km, seguida de la carretera afirmada Tarata-Mazo Cruz hasta los 69 km desde Tarata hasta la pampa Titire donde se toma un desvío de trocha carrozable con una longitud de 9 km hasta el manantial Ojos Copapujo.

1.2. CLIMA

La zona de estudio se ubica en la pampa Titire donde se proyecta la línea de transmisión eléctrica Tarata – Ojo Copapujo; en esta zona tenemos temperaturas extremas siendo los meses de junio, julio y agosto los que presentan las temperaturas más bajas con presencia de nieve y granizo mientras que en los meses de verano se presentan abundantes lluvias acompañado de tormentas eléctricas. En otoño y primavera es cuando se tiene un mejor clima. De registros de temperatura, humedad relativa y precipitación tenemos una temperatura máxima de 17 °C, temperatura mínima de -20 °C, una precipitación media anual de 400 mm y una humedad relativa del 20%.

1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.3.1. Planteamiento del problema

Tacna ubicada en la cabecera del desierto de Atacama, el más árido del planeta, enfrenta la escasez de recurso hídrico para consumo humano y la agricultura. Frente a esta realidad el Gobierno Regional de Tacna ha planteado soluciones como el traspaso de agua de la cuenca del río Maure a la cuenca del río Caplina, dentro del cual se tiene el proyecto Vilavilani II que consta del canal de derivación Calachaca y el proyecto de derivación de agua del manantial Ojo Copapujo hacia el mismo canal para aumentar el suministro de agua durante

tiempos de estiaje. Para este último proyecto se ha considerado una planta de bombeo que se ubicará cerca al manantial; entonces por la envergadura del proyecto es imperante conocer la realidad del subsuelo con respecto a las características geotécnicas de suelos y/o rocas, así como su distribución espacial.

Es importante mencionar que en los proyectos también surgen limitantes por el factor social, en este caso los comuneros del sector se opusieron al uso de perforaciones; solo permitieron la realización de una excavación supervisada bajo supervisión directa, que llegó a 6 metros de profundidad sin encontrar basamento rocoso. Por esta razón se vió la necesidad de aplicar métodos geofísicos (no invasivos) como la refracción sísmica y MASW para evaluar el área de emplazamiento de la planta de bombeo.

1.3.2. Formulación del problema

Con las premisas anteriores podemos formular lo siguiente:

1.3.2.1. Problema general

- ¿El área de estudio presenta características geotécnicas favorables para el emplazamiento de la planta de bombeo?

1.3.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las características geológicas del área de estudio?
- ¿Qué nos muestra la interpretación de la prospección sísmica?
- ¿Cómo se relaciona la información geológica y prospección sísmica?
- ¿Cuáles son los parámetros elástico dinámicos calculados mediante las velocidades de ondas P y S?

- ¿Qué nos indica el modelo geológico al integrar los parámetros elástico dinámicos?

1.3.3. Objetivos

1.3.3.1. Objetivo general

Determinar si el área de estudio presenta características geotécnicas favorables para el emplazamiento de la planta de bombeo.

1.3.3.2. Objetivos específicos

- Realizar el cartografiado geológico del área de estudio.
- Interpretar la prospección sísmica.
- Realizar un modelo geológico integrando la prospección sísmica y geología.
- Calcular los parámetros elástico dinámicos mediante las velocidades de ondas P y S.
- Realizar la evaluación geotécnica integrando los parámetros elástico dinámicos al modelo geológico.

1.3.4. Hipótesis

El área de estudio para el emplazamiento de la planta de bombeo presenta características geotécnicas favorables restringidas al tipo de cimentación a aplicar.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Para este trabajo de tesis se consultaron dos estudios relacionados con el área de interés, siendo el estudio a nivel de factibilidad para la planta de bombeo del año 2000 y el estudio de la línea de transmisión eléctrica Tarata-Ojo Copapujo del año 2009; ambas realizadas por el Proyecto Especial Tacna.

Ambos estudios indican que el área de interés se encuentra en una planicie aluvial rodeada de conos volcánicos recientes con presencia de lomas de origen piroclástico (tobas). En el estudio a nivel de factibilidad se ejecutan dos calicatas donde se describe la estratigrafía del área de estudio que está constituida por una capa superior de depósitos aluviales compuestos por arenas finas y gruesas intercaladas en matriz arena limosa, mal graduada y un nivel freático a 1 m de profundidad. Del estudio de la línea de transmisión eléctrica se extrajo la información de una calicata ubicada al inicio de esta, que describe al primer estrato como arenas sueltas pobremente gradadas de color beige oscuro, el nivel freático a 1,6 m y que se encuentran en proceso de intemperización cuyos clastos corresponden a la formación Purupurini.

Con respecto a las características geotécnicas en ambos estudios solo llegan a describir el primer estrato indicando arenas de baja compacidad infiriendo una baja capacidad portante; indicando además evaluar el emplazamiento de la planta de bombeo en las tobas.

Para entender el marco geológico regional que nos ayudó a la interpretación geológica se consultó al Boletín A 10 del INGEMMET que corresponde a la Geología de los Cuadrángulos de Maure y Antajave (Mendivil Echevarría, 1965). Este estudio también describe al área de interés como parte de la pampa Titire que es una planicie con depósitos de arena aluvial y depósitos de toba del Plioceno que sobreyacen a depósitos fluvio-glaciares también del Plioceno.

También se consultó a trabajos de tesis con una metodología de procesamiento de prospección sísmica similar al planteado en el presente trabajo, tales como Canqui Anquise (2013), Cahuana Ari (2009), Díaz del Castillo (2007), entre otros. En todos estos trabajos se procesa los resultados de prospección sísmica para la obtención de parámetros elástico dinámicos del suelo, la capacidad portante y asentamientos para la caracterización geotécnica del área estudiada pero no se realiza un modelamiento 3D, limitándose a secciones interpretadas y resultados puntuales.

2.2. TIPOS DE ONDAS SÍSMICAS

2.2.1. Ondas corpóreas

- **Primarias o de compresión (ondas P)**

Se propagan a través de un medio más rápido que los otros tipos de onda. Al propagarse el material se extiende y se comprime. Son conocidas también como ondas longitudinales (Quispe Palomino, 2012).

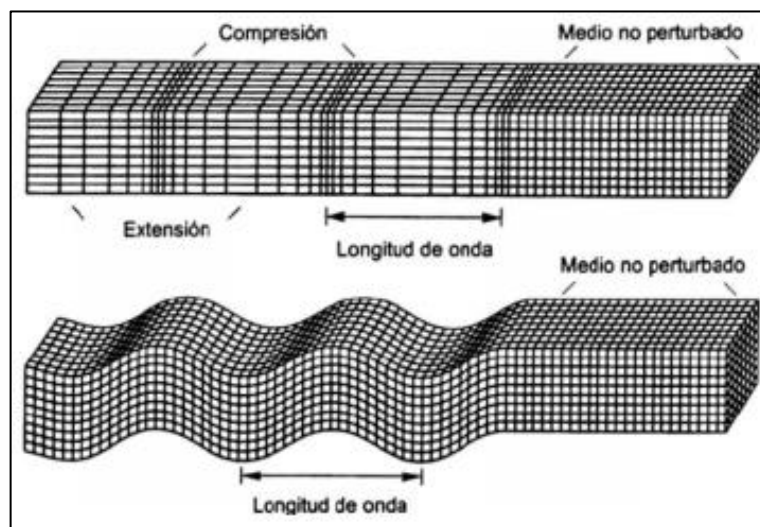
- **Secundarias o de cortante (ondas S)**

Se propagan más lento que las ondas P y hacen vibrar las partículas en sentido perpendicular a su propagación. El movimiento de las ondas de corte es atribuido

a dos componentes ortogonales, vertical (SV) y horizontal (SH) (Quispe Palomino, 2012).

Figura 2

Modelo de propagación de ondas P y S



Fuente: Exploración geofísica mediante métodos de refracción sísmica y MASW 1D en proyectos de ingeniería civil (Quispe Palomino, 2012).

2.2.2. Ondas Superficiales

Son ondas que se propagan a lo largo de la superficie de la tierra.

- **Ondas Love (ondas L)**

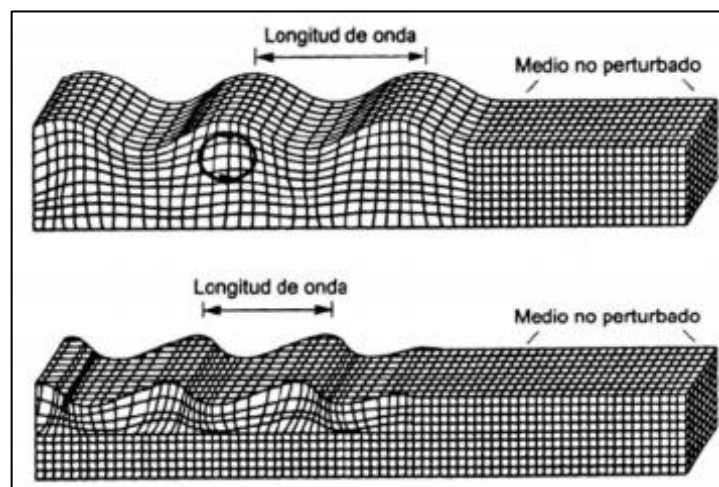
Son ondas que provocan cortes horizontales en la superficie. Se propagan de forma similar que las ondas S, pero sin movimiento vertical.

- **Ondas Rayleigh (ondas R)**

El movimiento de las partículas se desplaza según una trayectoria elíptica retrograda, las propiedades de las ondas Rayleigh son dependientes de la frecuencia en medios verticalmente heterogéneos, este tipo de ondas superficiales son utilizadas para representar y caracterizar el subsuelo superficial.

Figura 3

Modelo de propagación de ondas R y L



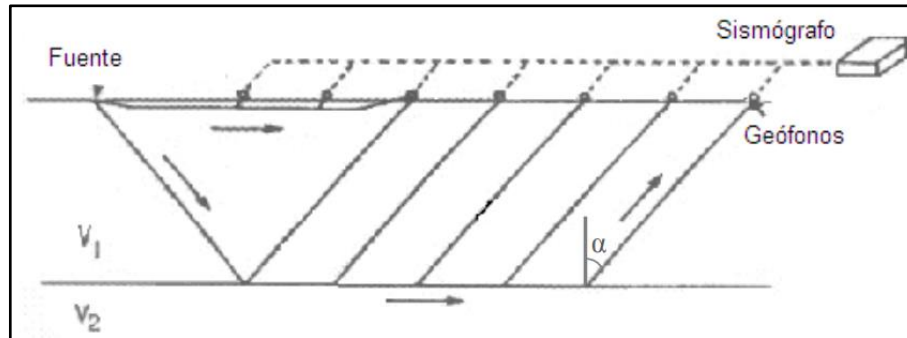
Fuente: Exploración geofísica mediante métodos de refracción sísmica y MASW 1D en proyectos de ingeniería civil (Quispe Palomino, 2012).

2.3. MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA

Según Redpath (como se citó en Rojas Vivas, 2008) este método se basa en la medición de los tiempos de viaje de las ondas generadas por una fuente (explosivos o medios mecánicos) en la superficie y que son refractadas en las interfaces entre medios con propiedades elásticas diferentes. El análisis de estos tiempos permite obtener un perfil de la distribución de los diferentes refractores con sus velocidades de propagación.

Figura 4

Diagrama esquemático con las trayectorias de onda de interés en el método de refracción sísmica y sus componentes básicos



Fuente: Sísmica de refracción y microtemores para caracterización de parámetros dinámicos superficiales en Caracas (Rojas Vivas, 2008).

- **Propagación y trayectoria de las ondas**

Al inducir ondas sísmicas mediante golpes o detonaciones en el suelo se generan ondas internas y superficiales, en la refracción sísmica la de mayor interés son las ondas P. Las leyes que rigen la propagación de las ondas sísmicas en la refracción, son las mismas que se utilizan en óptica (Quispe Palomino, 2012). Entonces se detalla la ley de refracción para mejor entendimiento de este método.

- **Ley de Refracción**

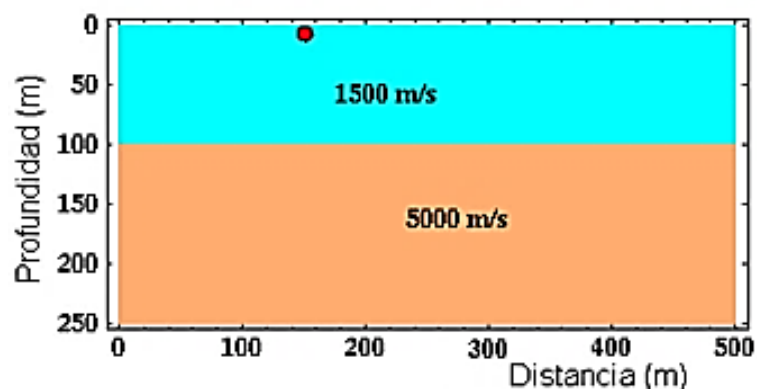
Define que el seno del ángulo incidente es proporcional al seno del ángulo de refracción como la velocidad incidente es a la velocidad de la onda refractada:

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

Se muestra un esquema (figura 5) que representa dos capas que tienen velocidad V_1 y V_2 , con $V_2 > V_1$, separadas por una interfase y a partir de una fuente sísmica ubicada en la superficie, la energía se desplaza en todas las direcciones

Figura 5

Modelo de dos capas

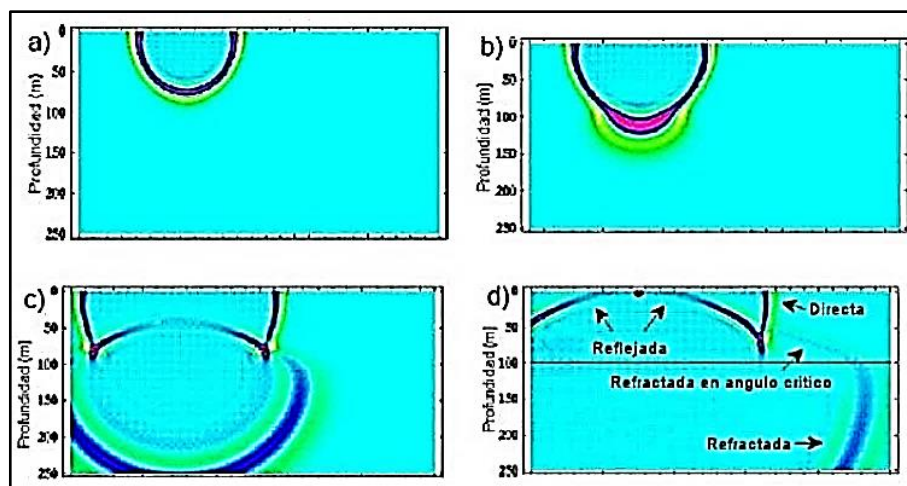


Fuente: Levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en el área de El Mamón, al norte del poblado de Urumaco, Estado Falcón (Peralta Segnini, 2007).

En la figura 6 se observa la propagación de los frentes de onda en el tiempo (a y b). En el cuadro c se identifica las ondas directas, reflejadas y refractadas. Por último, en el cuadro d se diferencian todos los frentes de ondas generados.

Figura 6

Propagación de las ondas en un medio de 2 capas

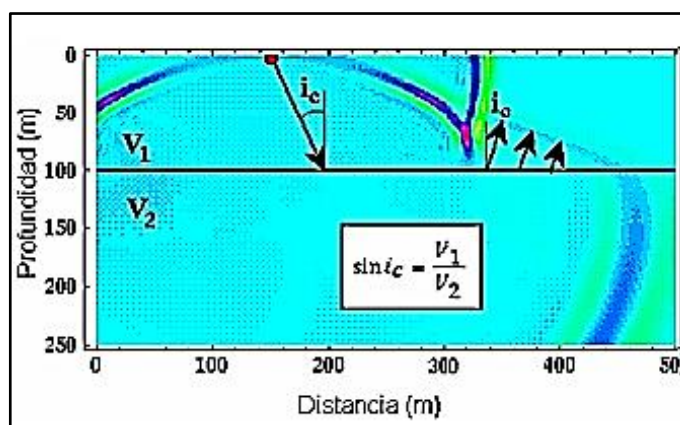


Fuente: Levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en el área de El Mamón, al norte del poblado de Urumaco, Estado Falcón (Peralta Segnini, 2007).

Cuando las ondas alcanzan en ángulo crítico i_c , en la interfaz entre los medios se genera el frente de ondas refractado hacia el medio superior. Este frente de onda viaja a lo largo de la interfase con una velocidad V_2 . Estas ondas poseen la propiedad de transmitir energía a la capa suprayacente mientras viaja en la interfase, como un frente de onda que emerge con un ángulo igual al de la incidencia (i_c). Existen infinitos frentes emergentes desde la interfase, estos son de relevancia durante la adquisición de datos, debido que esta energía es la que llega a los geófonos (figura 7).

Figura 7

Refracción al medio suprayacente con ángulo crítico i_c



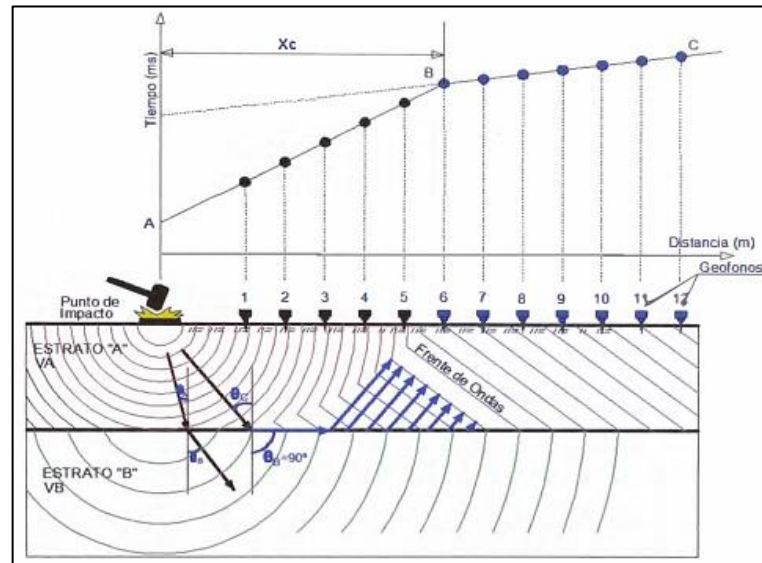
Fuente: Levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en el área de El Mamón, al norte del poblado de Urumaco, Estado Falcón (Peralta Segnini, 2007).

- **Curvas tiempo-distancia**

En los registros sísmicos se puede identificar la primera onda de llegada por cada señal de los geófonos, al terminar esta selección se genera la curva tiempo-distancia (Quispe Palomino, 2012).

Figura 8

Curva distancia-tiempo



Fuente: Exploración geofísica mediante métodos de refracción sísmica y MASW 1D en proyectos de ingeniería civil (Quispe Palomino, 2012).

La figura 8 muestra la curva tiempo-distancia (línea ABC), donde se observa la llegada de las ondas P. La distancia X_c , es la distancia donde el frente de onda refractado con ángulo crítico llega antes que la onda directa, esta distancia depende de las velocidades de los estratos, del espesor y profundidad, la distancia X_c puede ser mayor o menor que la longitud del tendido.

2.4. MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES

Este método por medio del registro sísmico analiza las ondas superficiales generadas por una fuente activa y la estimación del perfil de velocidad de ondas de corte. Presenta ventajas técnicas y logísticas que lo han llevado a ser uno de los principales métodos para definir clasificación sísmica del suelo (Portal Gonzales, 2017).

Este método utiliza el mismo equipo de refracción sísmica y un procedimiento parecido, siendo así muy eficiente, combinando una buena precisión, poco tiempo de consumo y un bajo costo de operación en relación a otras técnicas sísmicas.

- **Ondas Rayleigh**

Para la caracterización geotécnica con ondas superficiales, se supone que el tren de ondas está compuesto por ondas Rayleigh, esta se propaga por la superficie, o por el límite entre dos medios distintos, son ondas sísmicas plano polarizadas, con movimiento de vibración elíptico y retrogrado que se puede interpretar como una combinación de vibraciones tipo P y S (Pérez Santisteban, 2015).

Según Paricahua (como se citó en Villilli Vargas, 2018), estas ondas se pueden medir fácilmente a través de sensores colocados sobre el suelo además la mayor parte de la energía producida por una fuente se propaga en forma de ondas Rayleigh y por eso constituyen el mayor contenido energético en un registro sísmico.

Según Ewing et. al (como se citó en Villilli Vargas, 2018), la velocidad de propagación de las ondas Rayleigh depende de las propiedades elásticas, densidad natural del suelo y se relaciona con las velocidades de las ondas P y S mediante la siguiente formula:

$$\left(2 - \left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2\right)^2 - 4\left(1 - \left(\frac{V_r}{V_p}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 - \left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (2)$$

La V_r es menor que la V_s , y se relaciona por el coeficiente de Poisson (ν).

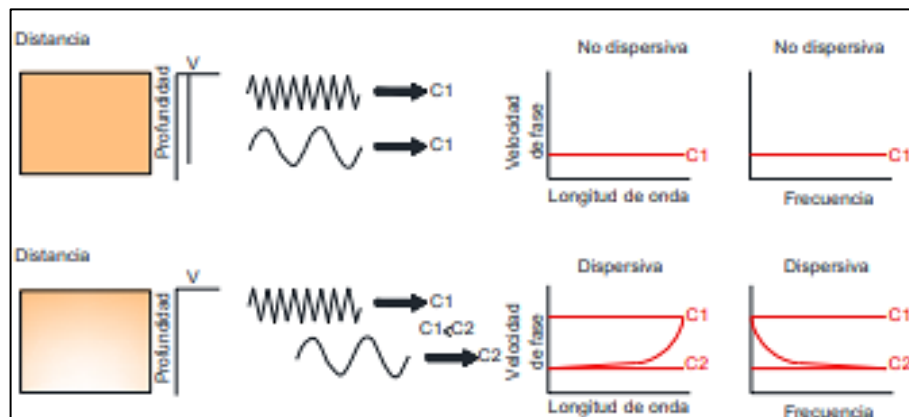
$$V_r = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \cdot V_s \quad (3)$$

- **Dispersión de ondas Rayleigh**

Se define dispersión de ondas al cambio de velocidades de las ondas Rayleigh en función de la frecuencia y longitud de onda. Cuando el medio de propagación es homogéneo la V_r es constante e independiente de la frecuencia. Pero si la rigidez varía con la profundidad, como el caso de los medios estratificados cada frecuencia viaja con una velocidad distinta (figura 9).

Figura 9

Dispersión de ondas Rayleigh



Fuente: Caracterización geotécnica de los suelos del volcánico Sencca, mediante refracción sísmica y análisis de ondas superficiales MASW en el A.A.H.H. villa Florida del distrito de Yura-Arequipa (Villilli Vargas, 2018).

Para una frecuencia de la onda Rayleigh están asociadas más de una velocidad de fase. La velocidad menor es llamada velocidad del modo fundamental o primer modo (Jaimes Villamizar, 2011).

$$V_r = f \cdot \lambda_r \tag{4}$$

Donde f es la frecuencia y λ_r es la longitud de onda. De esta ecuación se deduce que la frecuencia y la longitud de onda Rayleigh son inversamente proporcionales. También decimos que las ondas están asociadas a bajas

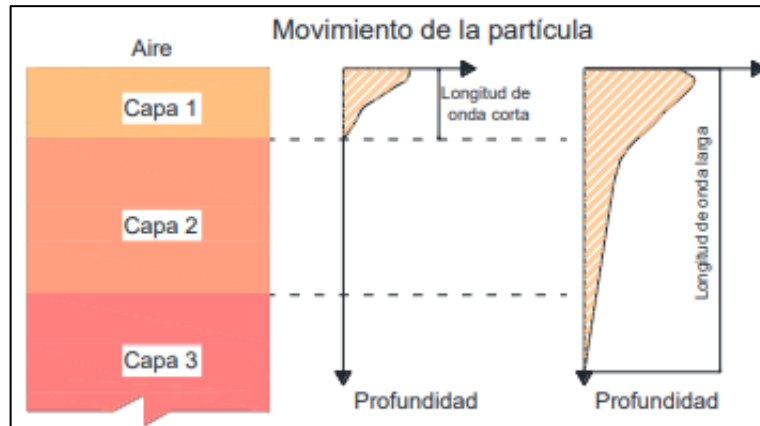
frecuencias, viajan a mayor velocidad y alcanzan mayores profundidades. Así tenemos que en un medio verticalmente heterogéneo las ondas superficiales con diferente frecuencia afectaran al propagarse a diferentes capas y en consecuencia su velocidad de fase estará relacionada con una combinación de las propiedades mecánicas del terreno afectado (Jaimes Villamizar, 2011).

La velocidad de onda S puede ser obtenida invirtiendo la velocidad de fase de la onda superficial. En el caso de un semi espacio sólido y homogéneo, la onda Rayleigh no es dispersiva y viaja con una velocidad aproximada de $0,9194V_s$ cuando la relación de Poisson es igual a 0,25. Mediante la inversión de los datos de dispersión de las ondas Rayleigh de alta frecuencia, se puede obtener velocidades confiables de onda S cercanas a la superficie (Villilli Vargas, 2018).

Al aumentar la profundidad de propagación, el movimiento de las partículas disminuye exponencialmente de manera que a una profundidad igual a una longitud de onda los movimientos de las partículas son muy pequeños, por lo que se considera que el espesor de terreno afectado por una onda Rayleigh es aproximadamente el de la longitud de onda, ver figura 10.

Figura 10

Dispersión geométrica en un medio estratificado, representa el desplazamiento en profundidad de dos frecuencias diferentes



Fuente: Caracterización geotécnica de los suelos del volcánico Sencca, mediante refracción sísmica y análisis de ondas superficiales MASW en el A.A.H.H. villa Florida del distrito de Yura-Arequipa (Villilli Vargas, 2018).

Debido al comportamiento dispersivo en los medios estratificados implica que hay una velocidad de grupo U la que se propaga, de manera que a la velocidad de grupo se le aplica la transformada de Fourier, entonces se vería un grupo compuesto por varias señales de distinta frecuencia cada uno viajando a su propia velocidad. Si se trata de un medio homogéneo la velocidad de fase y de grupo coinciden (Pérez Santisteban, 2015).

$$U \approx \frac{d\omega}{dk(\omega)} \approx V_r + f \frac{dV_r}{df} = V_r - \lambda \frac{dV_r}{df} \quad (5)$$

En el caso de dispersión normal (mayores velocidades V_r para longitudes de ondas largas), la velocidad del grupo U es menor que la velocidad de fase V_r , esto significa que la onda portadora viaja más rápido. Entonces la forma de grupo cambiará progresivamente al viajar por el terreno puesto que las longitudes de ondas más largas pasaran más rápidamente a través del grupo. Según avance la

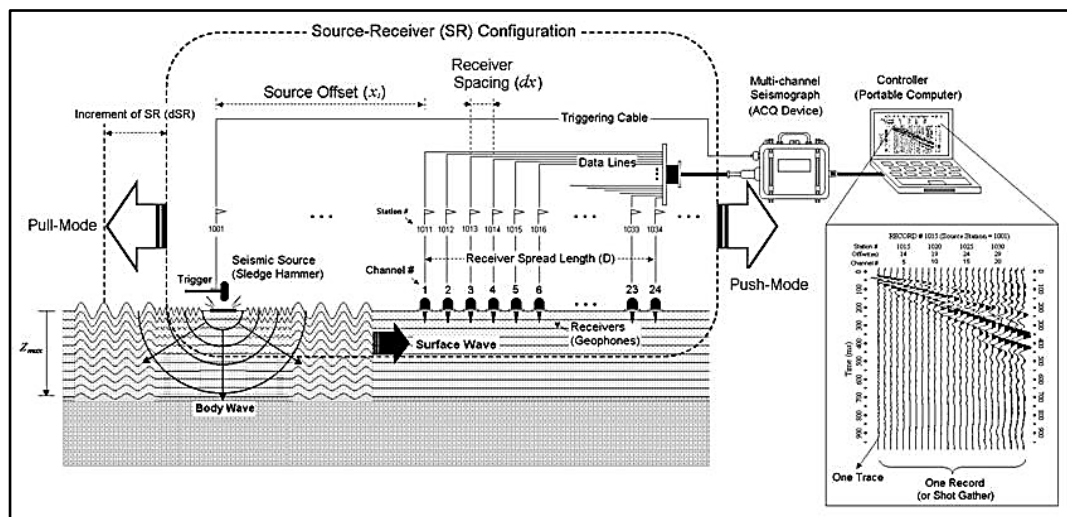
propagación, un pulso inicialmente concentrado se irá estirando hasta ser un tren de ondas cada vez más largo. Así en un medio donde la velocidad aumenta con la profundidad, las longitudes de ondas más largas llegaran primero a mayores distancias de la fuente sísmica (Pérez Santisteban, 2015).

- **Parámetros de adquisición de datos**

La configuración en campo para el MASW se ilustra en la figura 11. La profundidad máxima de investigación (Z_{max}) que se puede obtener de la prospección varía según los parámetros de adquisición de datos que se apliquen, también del sitio y el tipo de fuentes activas utilizadas (Park et al., 2014).

Figura 11

Esquema o arreglo de línea sísmica para el estudio de MASW en campo



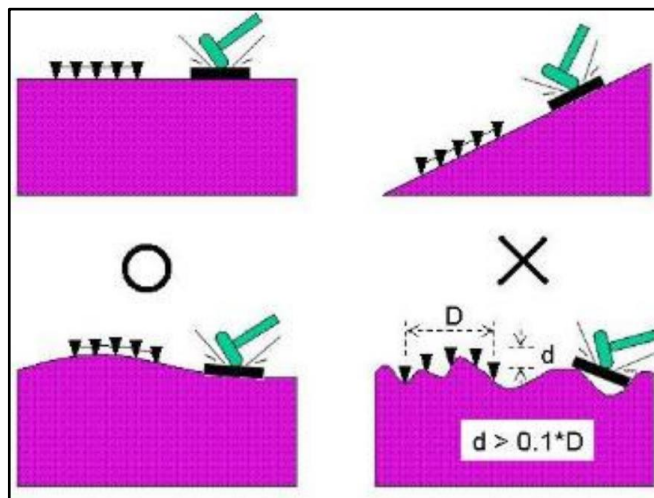
Recuperado de: <http://www.masw.com/DataAcquisition.html> (Park et al., 2014).

Las ondas de superficie se generan mejor sobre un terreno "plano" dentro de la longitud de propagación del receptor (D) (figura 12). Entonces la variación topográfica no debe ser crítica. Sin embargo, cualquier desnivel ondulado de

superficie cuya dimensión sea mayor que el 10% de D causará un impedimento significativo a la generación de ondas superficiales (Park et al., 2014).

Figura 12

Condiciones típicas del terreno favorables y desfavorables para el MASW



Recuperado de: <http://www.masw.com/DataAcquisition.html> (Park et al., 2014).

Un resumen de los parámetros de adquisición óptimos se muestra en la tabla 1, que determinan la profundidad máxima de datos confiables que puede registrar.

Tabla 1*Tabla de parámetros para la adquisición de registros MASW*

	Profundidad alcanzada (m)		
	5-10	10-20	20-30
Fuente (libras)	5-10	5-10	>10
Receptor (Hz)	≤10	≤10	4.5
Longitud (m)	5-30	10-60	20-90
Fuente receptora (m)	1-30	2-60	4-90
Espaciamiento entre receptores (m) - 24	0,2-1,2	0,4-2,5	0,8-3,8
Espaciamiento entre receptores (m) - 48	0,1-0,6	0,2-1,2	0,4-1,9
Fuente receptora lateral (m) - H	1-2	1-2	1-2
Fuente receptora lateral (m) - M	2-4	2-4	2-4
Fuente receptora lateral (m) - L	4-12	4-12	4-12
Longitud de muestreo (s)	0.5-1	1-2	1-2
Resolución de muestreo (ms)	0,5-1	0,5-1	0,5-1

Adaptado de Data Acquisition Parameters for Active MASW Survey (Park et al.,2014).

2.5. CONSTANTES ELÁSTICAS

Cetraro (como se citó en Rojas Vivas, 2008) define que los parámetros elásticos definen las propiedades y comportamiento de un material que se somete a esfuerzos, sufre deformaciones y luego se recupera su forma original después de que los esfuerzos cesan (un material elástico). Estas constantes están vinculadas a los valores de V_p y V_s .

2.5.1. Relación de Poisson (ν).

Mendoza (como se citó en Rojas Vivas, 2008) refiere que el coeficiente de Poisson es la tasa de deformación compresiva o transversal (normal a la carga aplicada) a la deformación extensiva o axial (paralela a la carga aplicada) para un material en particular. La relación de Poisson es una medida de esta tendencia.

En función de las velocidades sísmica la relación de Poisson tiene la siguiente ecuación:

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad (6)$$

2.5.2. Módulo de cizalla o rigidez (Gmax).

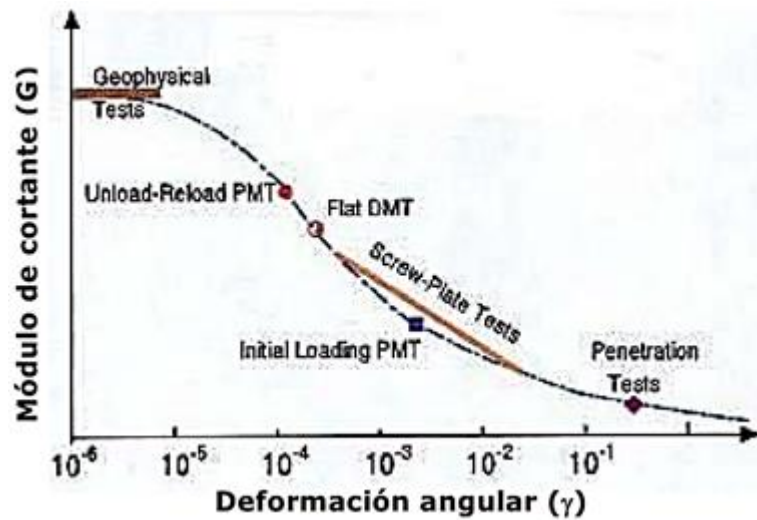
Mendoza (como se citó en Rojas Vivas, 2008) define este módulo como la tasa de esfuerzo cortante (de cizalla) a deformación cortante, es decir el comportamiento del mismo ante un esfuerzo de cizalla. En sólidos homogéneos e isótropos, la velocidad de las ondas de corte V_s está controlada por el módulo de cizalla.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (7)$$

Como las deformaciones angulares causadas por las pruebas geofísicas son muy pequeñas ($10^{-4}\%$) el módulo de cortante que se obtiene con la V_s viene siendo el valor máximo (G_0) y sufre una degradación mayor o menor dependiendo del suelo y de la deformación inducida. Como G_0 y E_0 son valores máximos para deformaciones angulares del orden de $10^{-4}\%$, sin embargo, se ha encontrado que la deformación angular promedio en cimentaciones bien diseñadas es de alrededor de $10^{-1}\%$ (figura 13), por lo que se recomienda usar en aquellos casos un valor reducido al 20% del G_0 (Díaz del Castillo, 2007).

Figura 13

Reducción del módulo cortante G contra deformación angular



Fuente: Caracterización de suelos arenosos mediante ondas de superficie (Díaz del Castillo, 2007).

2.5.3. Módulo elástico o Young (E_{max}).

Mendoza (como se citó en Rojas, 2008) define que este módulo proporciona una medida de la rigidez de un material elástico isótropo. Se define como el cociente entre el esfuerzo uniaxial sobre la deformación uniaxial. El módulo de Young puede ser expresado como:

$$E_{\max} = 2G_{\max}(1 + \nu) \quad (8)$$

2.5.4. Densidad

No es una constante elástica, pero es una propiedad importante en la transmisión de las ondas elásticas. Existe una relación directa entre la densidad y la velocidad de onda P de una capa de suelo (Tezcan et al., 2006):

$$\rho_p = \rho_0 + 0,002V_p \quad (9)$$

Dónde:

ρ_p : Peso unitario kN/m^3 .

V_p : Velocidad de la Onda P en m/s .

ρ_0 : El peso unitario de referencia (kN/m^3).

Los valores de ρ_0 dependen del tipo de material.

$\rho_0 = 16$ para material suelto de arenas, limos o arcillas.

$\rho_0 = 17$ para arena densa y grava.

$\rho_0 = 18$ para calizas, lutitas, conglomerados.

$\rho_0 = 20$ para arenisca craquelada, tobas esquistos.

$\rho_0 = 24$ para rocas duras.

2.6. CAPACIDAD PORTANTE POR LA METODOLOGÍA DE TEZCAN

La capacidad de carga para cimientos someros puede ser descrita en función de la velocidad de las ondas de corte V_s medidas in situ mediante métodos geofísicos. Dicha expresión concuerda con los resultados de la teoría clásica empleada en la investigación de dicho parámetro (capacidad de carga), y ha probado ser confiable y segura (Tezcan et al., 2006).

$$q_a = \frac{0,1\rho V_s}{n} \quad (10)$$

Para diferentes tipos de roca o suelos, se dan diferentes factores de seguridad, añadiendo también un factor de corrección según el ancho de zapata (tabla 2).

Tabla 2

Factor de seguridad n para suelos y rocas

Tipo	Rango de Vs (m/s)	n	qa (KN/m²)
Roca dura	$V_s \geq 4000$	$n = 1,4$	$q_a = 0,071\rho.V_s$
Roca blanda	$750 \leq V_s \leq 4000$	$n = 4,6-0,0008V_s$	$q_a = 0,1\rho.V_s/n$
Suelos	$750 \geq V_s$	$n = 4$	$q_a = 0,025\rho.V_s.\alpha$

Fuente: A rapid technique to determine allowable bearing preassure (Tezcan et al., 2007).

$$\alpha = 1 \quad \text{para } (0,00 \leq B \leq 1,20 \text{ m})$$

$$\alpha = 1,13 - 0,11B \quad \text{para } (1,2 \leq B \leq 3,0 \text{ m})$$

$$\alpha = 0,83 - 0,01B \quad \text{para } (3,0 \leq B \leq 12,0 \text{ m})$$

Donde α es el factor de corrección para suelos, según ancho de zapata (B). Otra consideración a tener en cuenta es que la capacidad de carga en una superficie de un terreno saturado será aproximadamente el 50% al 70% de la correspondiente a un terreno seco (Lambe y Whitman, 1981).

2.7. CORRELACIONES CON VS APLICADOS AL ANÁLISIS GEOTÉCNICO

2.7.1. Relación de las Vs y el ensayo de penetración estándar SPT

El valor de NSPT (N60) es el número de golpes que resulta de hincar 12 pulgadas en el suelo un muestreador cilíndrico, con un martillo de 140 libras desde una altura de 18 pulgadas y depende del tipo de suelo, de la presión de confinamiento y de la densidad del suelo. El número de golpes NSPT (N60) presenta varias relaciones con otros parámetros geotécnicos cómo la Velocidad de onda S (Vs), siendo así que se han formulado varias correlaciones alrededor del mundo (tabla 3).

Tabla 3*Correlaciones entre Vs y NSPT*

Investigadores	Ecuación	Observaciones
Imai y Yoshimura (1970)	$V_s=76N^{0.33}$	
Ohba y Toriumi (1970)	$V_s=84N^{0.31}$	
Imai (1977)	$V_s=aN^b$	a=102, b=0,29 Arcilla Holoceno a=81, b=0,33 Arena Holoceno a=114, b=0,29 Arcilla Pleistoceno a=102, b=0,29 Arena Pleistoceno
Ohta y Goto (1978)	$V_s=85,34N^{0.348}$	Para todo tipo de suelo
Okamoto et. al. (1989)	$V_s=125N^{0.3}$	Arenas del Pleistoceno
JRA (2002)	$V_s=80N^{1/3}$ $V_s=100N^{1/3}$	Arenas Arcilla
Alfaro (2007)	$V_s=99,783N^{0.333}$	
Maheswari et. Al.	$V_s=95,641N^{0.301}$	

Fuente: Correlación entre el Valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de Corte para Arcillas en Bogotá – Colombia (Alfaro Castillo, 2007).

Para el presente trabajo de tesis se usará la inversa de las correlaciones mostradas para obtener el NSPT y se aplicará la correlación que indiqué un mejor ajuste con los ensayos de laboratorio y sea conservador.

2.7.2. Relación del NSPT y la densidad relativa (Dr)

Según Terzaghi y Peck (como se citó en Devincenzi y Frank, 2004) existe una relación entre el ensayo de penetración estándar y la densidad relativa (Dr) que es una propiedad índice que muestra el grado de compactación de un suelo (figura 14).

Tabla 4

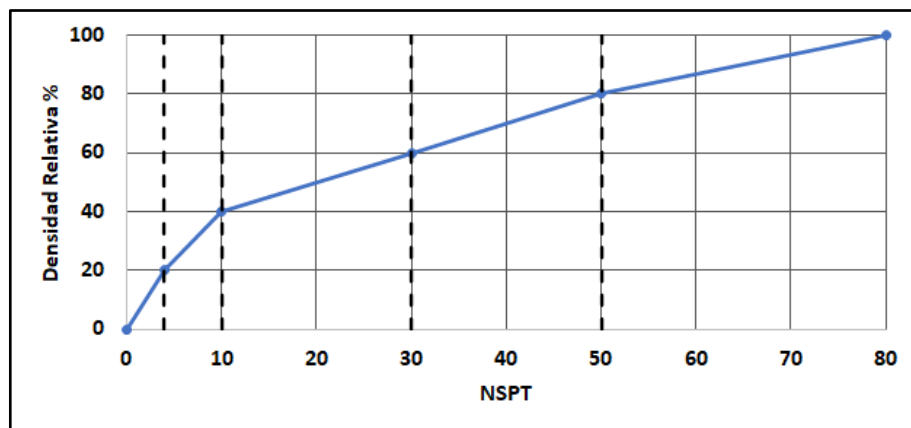
Relación entre NSPT y Dr según Terzaghi y Peck (1948)

NSPT	Dr%	Compacidad
0 - 4	0 - 20	Muy Suelto
4 - 10	20 - 40	Suelto
10 - 30	40 - 60	Compacto
30 - 50	60 - 80	Denso
50 - 80	80 - 100	Muy Denso

Fuente: Ensayos Geotécnicos insitu su Ejecución e Interpretación (Devincenzi,y Frank, 2004).

Figura 14

Relación Dr y NSPT



Fuente: Ensayos Geotécnicos insitu su Ejecución e Interpretación (Devincenzi y Frank, 2004).

El sistema anterior es modificado por Skempton en 1986 para tener en cuenta las normalizaciones del valor de $N(N_{160})$ (Devincenzi y Frank, 2004), tabla 5.

Tabla 5

Relación entre NSPT y Dr modificado por Skempton (1986)

NSPT	Dr%	Compacidad
0 - 3	0 - 15	Muy Suelto
3 - 8	15 - 35	Suelto
8 - 25	35 - 65	Compacto
25 - 42	65 - 85	Denso
42 - 58	85 - 100	Muy Denso

Fuente: Ensayos Geotécnicos insitu su Ejecución e Interpretación (Denincenzi y Frank, 2004).

Cabe indicar que la resistencia al cortante, los asentamientos y el potencial a la licuefacción también dependen de la densidad relativa por lo tanto también el NSPT nos ayuda a evaluarlos.

El fenómeno de licuación o licuefacción se produce cuando depósitos constituidos por materiales como arcillas saturadas muy sensibles, arenas secas sueltas y arenas saturadas, son afectados por el paso de ondas sísmicas, produciendo una pérdida de la resistencia al corte; comportándose, así como si fuera un líquido viscoso.

Entre los muchos factores que condicionan la susceptibilidad de una arena a la licuefacción (características del sismo, densidad relativa, granulometría, estratigrafía del depósito, estructura interna del suelo, plasticidad, permeabilidad, grado de saturación y % de finos) es la densidad relativa la que más relevancia tiene. Las arenas densas (material con relación de vacíos pequeña) son menos susceptibles a la licuación que las arenas sueltas.

Según Ovando y Segovia (como se citó en Vargas Moreno, 2015), las arenas densas (material con relación de vacíos pequeña y una densidad relativa mayor

al 65 %), son menos susceptibles a la licuación que las arenas sueltas. Este criterio será empleado en el presente trabajo de tesis.

2.7.3. Relación entre el ángulo de fricción y la densidad relativa

La resistencia de suelos granulares está relacionado al ángulo de fricción interna, la densidad relativa, relación de vacíos, porosidad, entre otras propiedades volumétricas de la mecánica de suelos.

Según Gonzáles et al. (2014) refiere a los siguientes autores que determinaron relaciones entre el ángulo de fricción interna y la densidad relativa: Meyerhof (1956) determina relaciones dependiendo de la cantidad de finos del suelo, Burmister (1948) propone relaciones con respecto a la granulometría, Giulianani (1982) propone una ecuación general mediante métodos estadísticos y Gonzáles (2014) propone una ecuación general que la obtiene trabajando con arenas limosas, gravas y gravas arcillosas (ver tabla 6).

Tabla 6

Relación entre el ángulo de fricción interna y la densidad relativa por diversos autores

Investigador	Ecuación	Observación
Meyerhof 1956	$\Phi=25+0,15Dr\%$	> 5% arena fina y limo
	$\Phi=30+0,15Dr\%$	< 5% arena fina y limo
Giuliani 1982	$Tg(\Phi)=0,575+0,361Dr^{0.866}$	
	$\Phi=28+0,14Dr\%$	Arena Fina
Burmister 1948	$\Phi=31,5+0,115Dr\%$	Arena Media
	$\Phi=34,5+0,10Dr\%$	Arena Gruesa
	$\Phi=38+0,08Dr\%$	Gravilla Uniforme
Gonzáles 2014	$\Phi=32,394+0,1292Dr\%$	

Fuente: Determinación del parámetro de resistencia, ángulo de fricción Interna (ϕ) y su relación con los parámetros densidad relativa (Dr) y relación de vacíos (e) en suelos granulares (Gonzáles et al., 2014).

En la tabla 7 se muestran valores para el ángulo de fricción en arenas que se tomarán como referencia para los resultados mediante las correlaciones.

Tabla 7

Valores típicos del ángulo de fricción

Tipo de Suelo	ϕ (grados)
Arena: granos redondeados	
Suelta	27-30
Media	30-35
Densa	35-38
Arena: granos angulares	
Suelta	30-35
Media	35-40
Densa	40-45
Grava con algo de arena	34-48
Limos	26-35

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M., 2001).

2.8. CÁLCULO DE ASENTAMIENTO EN SUELOS GRANULARES

Los asentamientos se producen en cualquier tipo de suelo después de aplicar cargas sobre este. El cálculo de asentamientos se realiza por medio de la teoría elástica, la cual puede emplearse para obtener una estimación de los asentamientos iniciales. El módulo de elasticidad es el parámetro más importante y se debe seleccionar teniendo en cuenta la magnitud del esfuerzo inicial como su variación, sin embargo, una masa de suelo no tiene valores únicos de este módulo y relación de Poisson.

Según Schmertmann y Hartman (como se citó en Braja M., 2001) la metodología de cálculo para el asentamiento elástico inmediato para suelos

granulares aplica un factor de influencia semiempírico, siendo este el método a aplicar en el presente trabajo. De acuerdo con este método el asentamiento es:

$$S_e = C_1 C_2 (q_{tr} - q) \sum_0^{z_2} \frac{I_z}{E_s} \Delta z \quad (11)$$

$$C_1 = 1 - 0,5 \left(\frac{q}{q_{tr} - q} \right) \quad (12)$$

$$C_2 = 1 + 0,2 \log \left(\text{tiempo en } \frac{\text{años}}{0,1} \right) \quad (13)$$

$$q = \gamma D_f \quad (14)$$

Donde:

I_z : Factor de influencia de la deformación unitaria en el centro del estrato.

E_s : Módulo de elasticidad del estrato.

C_1 : Factor de corrección para la profundidad del empotramiento.

C_2 : Factor de corrección para tomar en cuenta el flujo plástico en el suelo.

q_{tr} : Esfuerzo a nivel de la cimentación.

La variación del factor de influencia de la deformación unitaria con la profundidad debajo de la cimentación lo muestra la figura 15. Para cimentaciones cuadradas o circulares estos factores son:

$$I_z = 0,1 \quad \text{en } z = 0$$

$$I_z = 0,5 \quad \text{en } z = z_1 = 0,5B$$

$$I_z = 0 \quad \text{en } z = z_2 = 2B$$

Similarmente, para cimentaciones con $L/B \geq 10$.

$$I_z = 0,2 \quad \text{en } z = 0$$

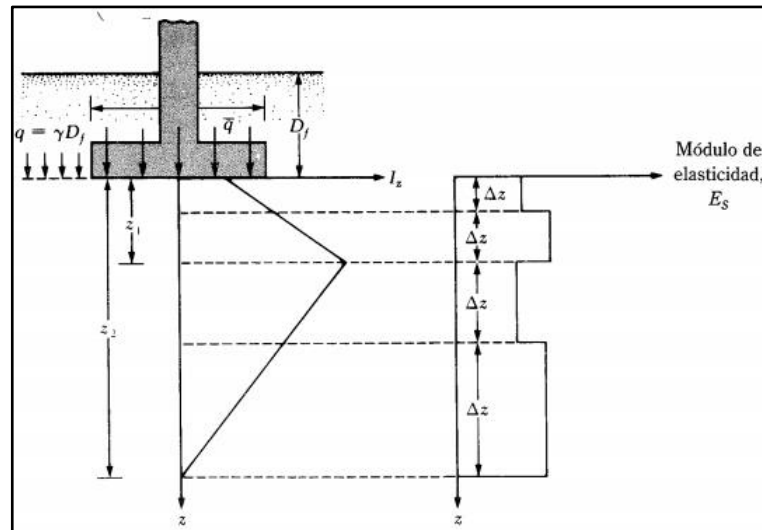
$$I_z = 0,5 \quad \text{en } z = z_1 = 1B$$

$$I_z = 0 \quad \text{en } z = z_2 = 4B$$

Donde B es el ancho de la cimentación y L la longitud. Para valores L/B entre 1 y 10 se puede interpolar según sea necesario.

Figura 15

Cálculo de asentamiento elástico usando factor de influencia de la deformación unitaria



Fuente: Principio de Ingeniería de Cimentaciones (Braja, M., 2001).

2.9. MODELAMIENTO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO

Un modelo geológico representa la distribución espacial de unidades geológicas tanto en superficie como en el subsuelo y son importantes para investigaciones en la exploración minera, exploración de hidrocarburos, el emplazamiento de obras civiles de gran envergadura, entre otras. En este último aspecto entran a ser aplicados los modelos geotécnicos que representan las características geotécnicas de las unidades geológicas.

2.9.1. Limitaciones de un modelo geológico y geotécnico

Las limitaciones recaen en la cantidad y calidad de datos disponibles; pocos datos permiten realizar un modelo simplificado en cambio grandes cantidades nos permitiría realizar un modelo con detalle, a esto debemos sumar la calidad de estos datos ya que no verificarlo nos llevará a un modelo errado. Los datos pueden provenir de perforaciones, calicatas, cartografiado, datos geofísicos, etc.

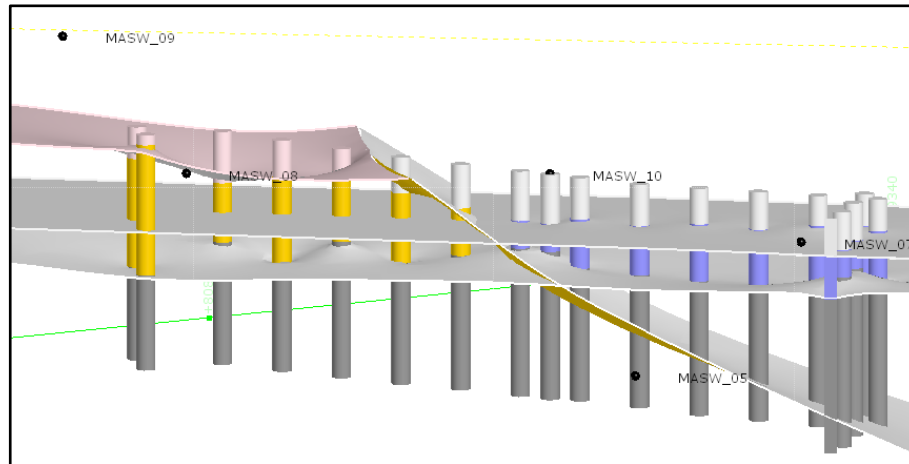
El modelo geotécnico depende de la calidad del modelo geológico, investigaciones directas o indirectas, y los ensayos con fines geotécnicos. En caso de suelos se deben realizar ensayos con fines de clasificación (granulometría, límites de Atterberg, humedad, etc.), especiales e in situ.

2.9.2. Modelamiento implícito

El modelamiento implícito actualmente es un método muy aplicado para la generación rápida de modelos geológicos 3D, porque genera mediante interpolaciones superficies de contacto que limitarán las unidades geológicas; para ello emplea polilíneas, puntos, superficies y datos de sondajes. En la figura 16 se muestra como esta metodología genera superficies con datos de sondajes.

Figura 16

Modelamiento implícito, se observa la creación de superficies de contacto y sin restricciones, al indicar el orden cronológico de estratos se generan los sólidos necesarios

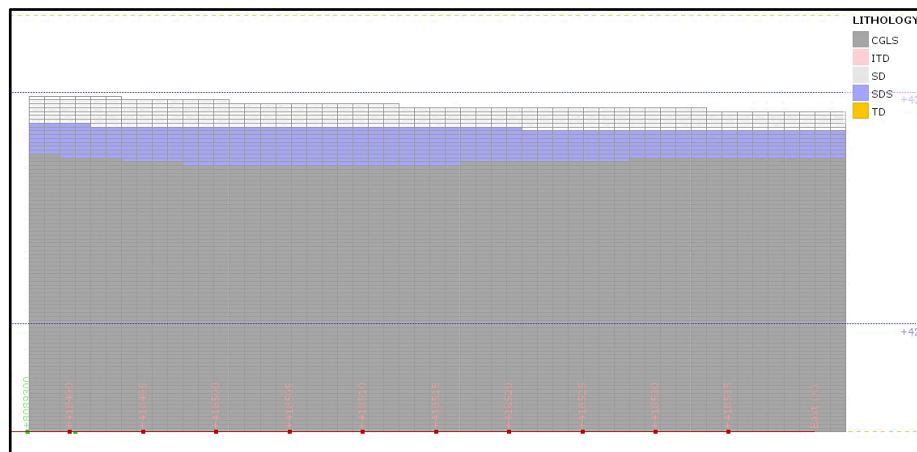


2.9.3. Modelo de bloques

Los sólidos creados en un modelo geológico son considerados como elementos irregulares por su geometría, un modelo de bloques es su equivalente regular porque los representan como un conjunto de bloques; para ello se debe definir el tamaño de los bloques para que sean congruentes con los contactos entre sólidos.

Figura 17

Modelo de bloques y la importancia del tamaño del bloque para representar los contactos. Corte o sección 2D, nótese la influencia del tamaño de bloque para representar los contactos entre estratos



La ventaja de un modelo de bloques recae en que cada elemento puede representar más de una variable tanto numérica o categórica permitiendo ser representado como una base de datos espacial donde podemos realizar cálculos, filtros y consultas que nos ayuden en la toma de decisiones.

2.9.4. Interpolación mediante Distancia Inversa Ponderada

Este método calcula los valores de un atributo en puntos no muestreados usando una combinación lineal de los valores en puntos de la muestra ponderada (peso) por una función inversa de la distancia, es decir el peso es inversamente proporcional a la distancia. Cuanto más cerca está el punto muestreado al punto a estimar, mayor será la influencia de esta muestra (Rocha Salamanca, 2016).

Este método puede ser expresado en la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^a} z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^a}} \quad (15)$$

Donde:

Z: Valor a ser estimado.

z_i : Muestras de entrada.

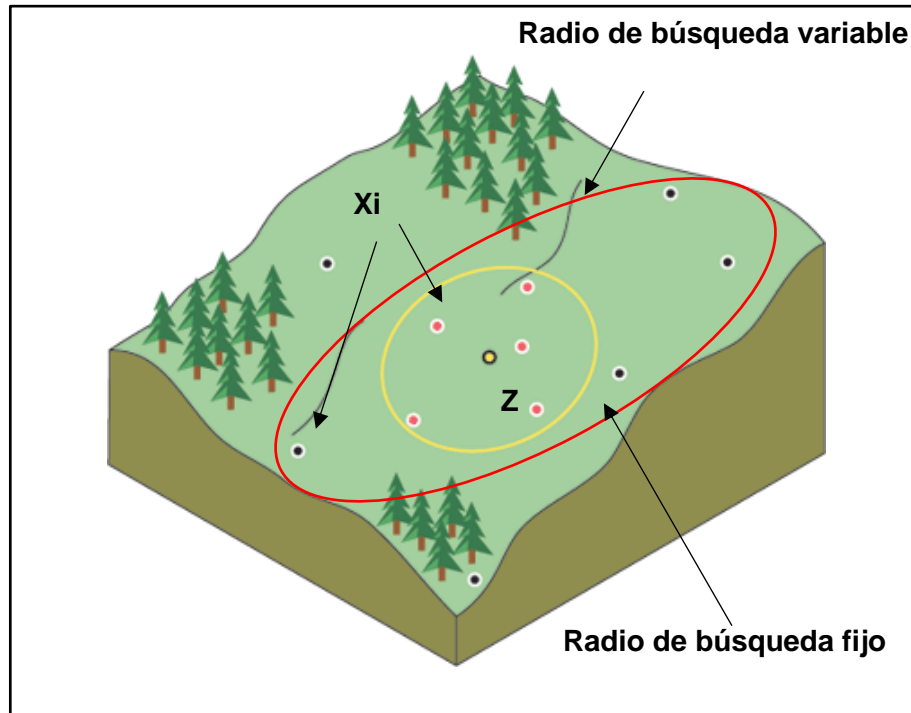
d_i : Distancia entre las muestras al punto a estimar.

a: Valor ponderado de la distancia.

Por defecto los softwares que poseen este método aplican un radio de búsqueda fijo, esto quiere decir que las muestras no tendrán prioridad en una dirección específica, pero también tienen la opción de indicar un radio de búsqueda variable (figura 18) donde podemos indicar a que ejes del espacio se tendrá prioridad para la interpolación. Esta opción es importante para reflejar las características de la litología, por ejemplo, para estratos horizontales la prioridad de muestras interpoladas será en la dirección X e Y, dando poca influencia en el eje Z.

Figura 18

Esquema de la interpolación por Inverso de la Distancia Ponderada (IDW)



Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>.

CAPÍTULO III

MARCO GEOLÓGICO

3.1. GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se encuentra en la pampa Titire, la cual está dentro de la unidad geomorfológica de altiplanicie. Esta unidad abarca una cota de 4200 a 4600 m.s.n.m. con presencia de lomadas con pendientes promedio de 30° producto del emplazamiento de morrenas y depósitos piroclásticos de toba dacítica con pendientes de 20° promedio. Junto a las lomadas tenemos planicies formadas por depósitos aluviales producto del intemperismo y erosión del Hipabisal Purupurini. Estos depósitos sedimentarios se acumulan entre dos centros volcánicos extintos formados por los cerros Antajave y Purupurini al SO y por el NE el cerro Chocata y cerro Chila, estos dos lineamientos de cerros han creado una depresión que se ha rellenado formando una planicie, esta zona es poco erosionable por poseer un alto grado de infiltración y bajas pendientes.

3.2. GEOLOGÍA REGIONAL

La zona de estudio se encuentra ubicada en el cuadrángulo 35x-3 de Maure en la vertiente del Lago Titicaca y flanco occidental de los Andes. Las formaciones geológicas datan del Neógeno-Plioceno hasta depósitos recientes del Holoceno.

Estas formaciones son descritas por Mendívil Echevarría (1965), siendo la primera la formación Capillune (Pleistoceno Superior) que consiste en una intercalación de arcillas, limolitas, areniscas, conglomerados y piroclásticos. Luego describe el grupo Barroso, entre estos el volcánico Chilca (Plio-Pleistoceno)

compuesto por derrames volcánicos y piroclásticos que forman los conos volcánicos más antiguos del área. El volcánico Barroso (Pleistoceno) compuesto por derrames andesíticos a traquiandesíticos. El volcánico Purupurini (Pleistoceno) compuesta por rocas volcánicas que consisten en tufos traquíticos a traquiandesíticos de grano grueso.

Suprayaciendo a este grupo volcánico se presentan depósitos sedimentarios y piroclásticos del Pleistoceno; como los depósitos morrénicos antiguos que consisten en una mezcla de bloques y fragmentos angulosos mayormente volcánicos en una matriz de grano fino hasta grueso. También se presentan depósitos fluvioglaciares que consisten en arenas gruesas, gravillas, gravas de composición volcánica y de menor proporción de fragmentos grandes. Suprayaciendo a estos depósitos se encuentran depósitos de cenizas de color blanquecino a gris claro, cuya litología consiste de material fragmentario de 1 a 4 mm de tamaño con presencia de partículas de pómez, feldespatos y cuarzo.

En los depósitos del Holoceno también se presentan depósitos morrénicos con una granulometría menor que los antiguos y de menor extensión. Se presentan depósitos aluviales que constituyen gran parte de las planicies y en muchos casos corresponden a verdaderas llanuras aluviales. Estos depósitos se componen de gravas, arenas y arcillas, mayormente de naturaleza volcánica.

En la figura 19 se muestra la columna estratigráfica que representan a las formaciones geológicas descritas.

Figura 19

Columna estratigráfica a nivel regional construida a base de la recopilación bibliográfica

Sistema	Época	Columna Estratigráfica	Unidad
Cuaternario	Holoceno		Dep. eólicos
			Dep. aluviales
			Dep. morrénicos
	Pleistoceno		Dep. de ceniza
			Dep. fluvioglaciares
			Dep. morrénicos antiguos
			Grupo Barroso
	Fm. Purupurini		
	Fm. Barroso		
Neógeno	Plioceno		Fm. Chilca
	Fm. Capillune		

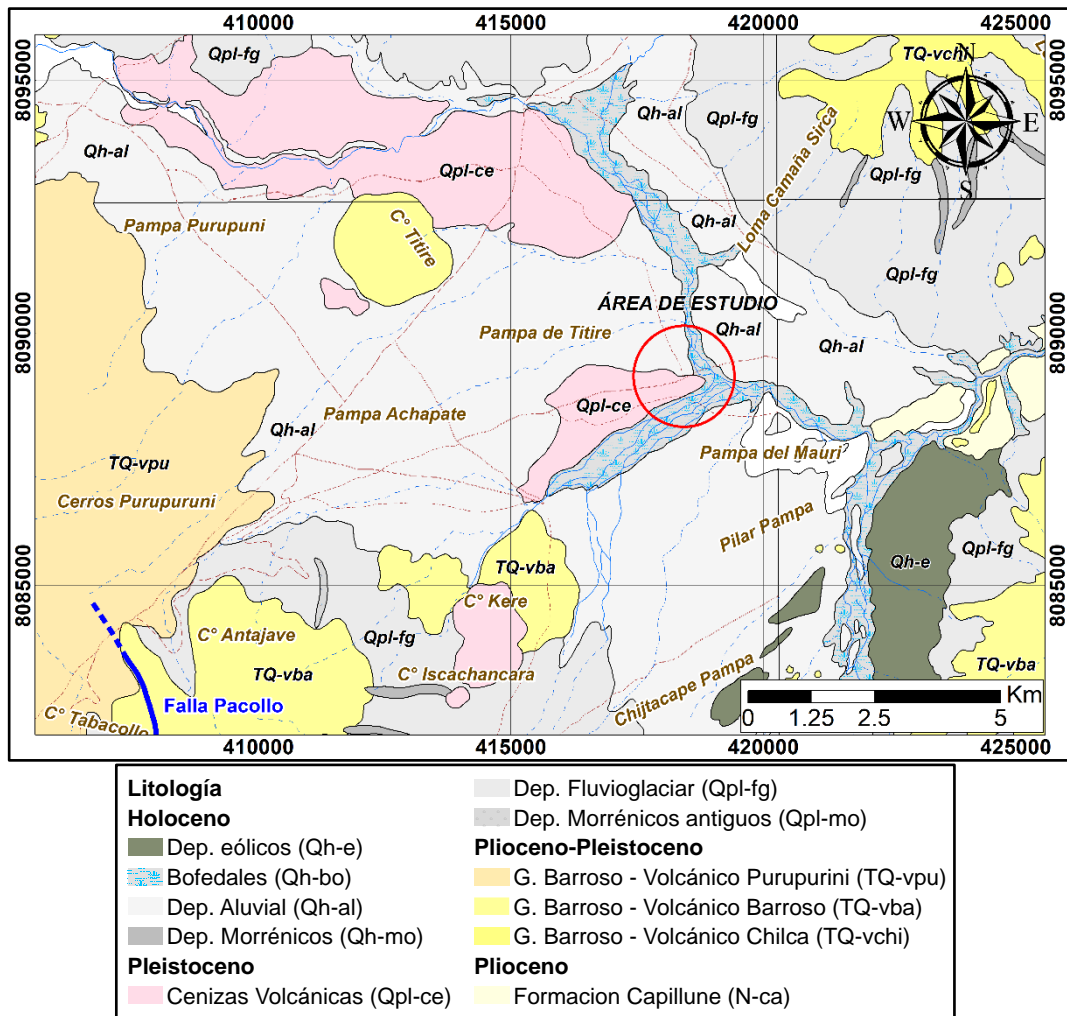
3.2.1. Estructuras o Fallas

Mendívil Echevarría (1965), describe lo siguiente con respecto a la geología estructural del cuadrángulo de Maure. La falla más importante es la de Pacollo que se reconoce por una distancia de 6.5Km con rumbo de N5°O a partir del Cerro Antajave, cambia a N30°O hasta perderse debajo de depósitos fluvioglaciares.

En la figura 20 se muestra la distribución de las formaciones geológicas y la falla principal descrita en un plano, indicando la ubicación del área de estudio con respecto al marco geológico regional.

Figura 20

Plano geológico regional. Recuperado de la base de datos de GeoGPS Perú



Fuente: <https://www.geogpsperu.com/2016/03/descargar-cartas-geologicas-del-peru.html>.

3.3. GEOMORFOLOGÍA LOCAL

El área de estudio se ubica en las riberas del río Maure, que presenta canales e islas de arena, temporales o permanentes; la planta de bombeo se proyecta en el margen derecho del río y al sur del manantial Ojos Copapujo; esta área corresponde a una planicie con suave pendiente menor a 10° formados por arenas aluviales que suprayacen a depósitos fluvioglaciares. También se presentan pequeñas lomas formadas por depósitos piroclásticos que por acción del intemperismo presenta una capa menos competente y de menor densidad.

3.4. GEOLOGÍA LOCAL

Las unidades geológicas en la zona de estudio pertenecen al Pleistoceno y Holoceno (cuaternario reciente). Estas unidades fueron identificadas realizando un cartografiado geológico a escala 1/250 y calicatas; siendo denominadas desde la base hacia el techo como depósitos fluvioglaciares, depósitos piroclásticos de toba dacítica y depósitos aluviales.

3.4.1. Depósitos fluvioglaciares

Son arenas con presencia de gravas; las gravas son de composición volcánica en general, subangulares a subredondeados con un diámetro máximo de 5 cm, la arena es conformada por detritos de igual composición con diámetro de 0,5 mm (grano grueso). Estas arenas gravosas presentan una compactación alta, están cementadas parcialmente por óxidos de hierro y se encuentran en un estado saturado. Mediante una excavación en el área de estudio se observó estos depósitos a 2,9 m de profundidad con una continuidad vertical hasta 6 m (figura

21). Estos depósitos se encuentran infrayaciendo a tobas dacíticas y a los depósitos aluviales.

Figura 21

Fotografía de la excavación ejecutada en el área de estudio. El nivel freático se observa en los depósitos fluvioglaciares debido a su descenso producido por la excavación, el nivel freático se tiene desde el estrato de depósitos aluviales



3.4.2. Depósitos piroclásticos de toba dacítica

Son tobas de ceniza no soldadas con textura piroclástica de color blanco a gris claro, macroscópicamente se observa pómez en mayor proporción, ojos de cuarzo, plagioclasas y en menor proporción biotitas y líticos. Se caracterizan por ser de baja densidad.

Esta toba pertenece a eventos volcánicos recientes posterior a la deposición de sedimentos de origen glaciar. En el área de estudio esta toba presenta una potencia de 5 m aproximadamente la cual yace sobre los depósitos fluvioglaciares.

Figura 22

Fotografía de tobas dacíticas en el área de estudio. Se muestran los depósitos piroclásticos presentando intemperismo moderado



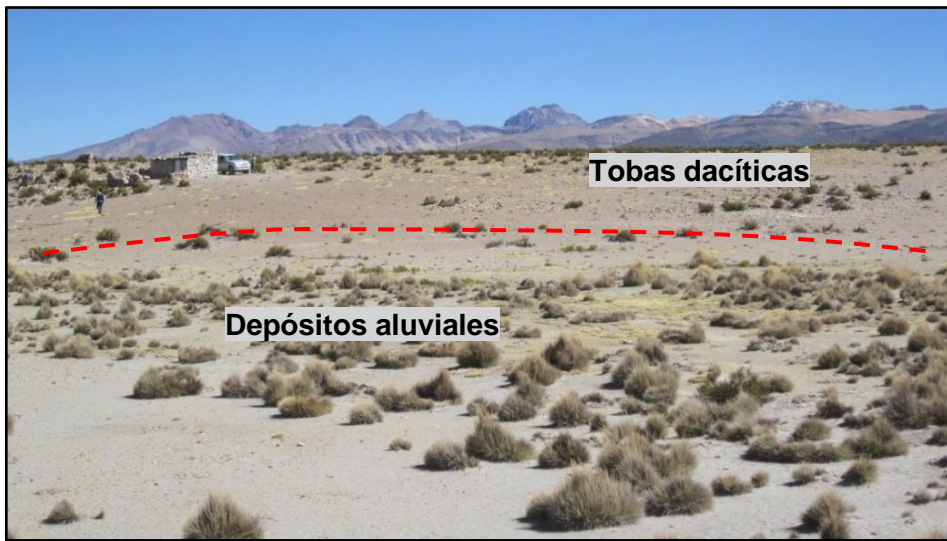
3.4.3. Depósitos aluviales

Estos depósitos pertenecen al cuaternario reciente y están compuestos por arenas de grano fino de color gris claro con presencia de clastos redondeados de composición volcánica y detritos de cuarzo, siendo deleznable o sueltas. Se encuentran distribuidas en toda la extensión de la altiplanicie. En la excavación realizada en el área de estudio se observa que estas arenas presentan una potencia de 2,9 m .

Estos depósitos cubren parcialmente los depósitos piroclásticos, lo cual no permite ver el contacto entre las tobas con los depósitos fluvioglaciares (figura 23).

Figura 23

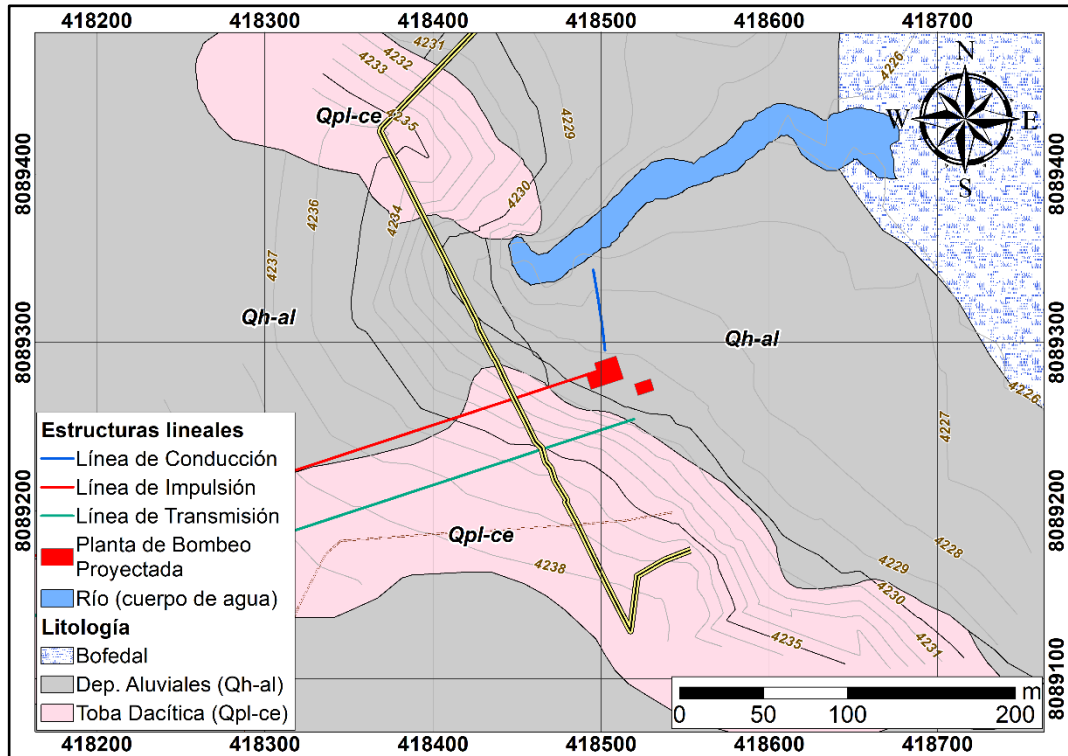
Fotografía de las arenas aluviales en el área de estudio. Se muestra el área donde se proyecta la planta de bombeo en la planicie. También podemos observar el desnivel indicando la presencia depósitos piroclásticos formando pequeñas lomadas



En la figura 24 se muestra el cartografiado geológico del área de estudio.

Figura 24

Plano geológico local del área de estudio, elaborado con el sistema de coordenadas UTM WGS84. Se ubica como referencia el área de emplazamiento para la planta de bombeo



CAPÍTULO IV

ESTUDIO DE PROSPECCIÓN SÍSMICA Y MECÁNICA DE SUELOS

4.1. GENERALIDADES

El proyecto de la planta de bombeo al encontrarse cerca a una fuente de agua toma interés por parte de las comunidades sobre los aspectos ambientales, por esta razón las autoridades de estas comunidades limitaron al estudio a no realizar perforaciones. Solo se permitieron la realización de calicatas y una excavación de 6 m. bajo supervisión directa.

Con estas limitaciones se optó por métodos no invasivos como la refracción sísmica y MASW, porque era necesario obtener información a más de 10 m de profundidad donde se emplazará la cimentación de la planta de bombeo.

Antes de realizar la prospección sísmica se hicieron ensayos de prueba con el sismógrafo dentro de las instalaciones del Proyecto Especial Tacna, sobre un terreno conocido para corroborar si los datos registrados son congruentes, comprobando que el equipo toma registros adecuados y correctos.

4.1.1. Materiales y equipos

- Sismógrafo GEOMETRICS ES-300.
- Geófonos de 4 y 14 Hz.
- Martillo de 18 lb, cables de conexión para fuente y receptores.
- Laptop para campo TOSHIBA y batería 12 V.
- Planos Topográficos.
- GPS, brújula y libreta de campo.

4.2. ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA

4.2.1. Adquisición de datos

Se realizaron 11 líneas de refracción sísmica de 33 m y se encuentran codificadas como RS01 hasta RS11. En la tabla 8 se indican las coordenadas inicio y fin de estas líneas, además de la dirección azimutal y longitud.

La ubicación de las líneas de refracción sísmica se puede apreciar en el Anexo 01C de “Distribución de Ensayos Geofísicos y Calicatas”.

Tabla 8

Datos de ubicación de las líneas de refracción sísmica. Coordenadas en sistema de coordenadas UTM WGS84

Línea Sísmica	Este Inicio UTM	Norte Inicio UTM	Este Fin UTM	Norte Fin UTM	Azimut (°)	Longitud (m)
RS01	418 469	8 089 435	418 478	8 089 403	163,3	33
RS02	418 432	8 089 462	418 445	8 089 432	156,6	33
RS03	418 509	8 089 444	418 538	8 089 459	62,7	33
RS04	418 541	8 089 307	418 561	8 089 333	37,6	33
RS05	418 535	8 089 249	418 560	8 089 227	131,5	33
RS06	418 592	8 089 204	418 616	8 089 181	133,7	33
RS07	418 499	8 089 281	418 523	8 089 259	132,5	33
RS08	418 480	8 089 250	418 510	8 089 237	112,8	33
RS09	418 446	8 089 275	418 464	8 089 247	147,8	33
RS10	418 480	8 089 255	418 501	8 089 281	38,7	33
RS11	418 465	8 089 308	418 492	8 089 288	126,5	33

La adquisición de datos se realizó con un sismógrafo modelo ES-3000 de la empresa GEOMETRICS. En las líneas de refracción se usó 12 canales (geófonos de 14 Hz) con 3 m de separación. Se usó como fuente un martillo de 18 lb, éste se impactó sobre una placa metálica produciendo las ondas elásticas. Adicionalmente se usó una laptop para el registro de datos (figura 25).

El sismógrafo tiene una resolución de 24 bits y permite tasas de muestreo de 0,0625; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0 y 2,0 ms; los registros fueron grabados con tasas de muestreo de 0,125 ms y 0,25 s para la longitud de registro. Se tomaron 5 registros para cada ensayo para mejorar la interpretación que se ve afectada por ruido generado por el flujo del agua del manantial y viento de la zona, también se realizó tres staking (lecturas continuas) por registro para mejorar la precisión de los mismos.

Figura 25

Fotografía durante la adquisición de datos por refracción sísmica. Se visualiza el sismógrafo ES3000, los geófonos azules (14 Hz) plantados y geófonos rojos (4 Hz) a un lado para su posterior uso en el ensayo MASW



4.2.2. Procesamiento de datos

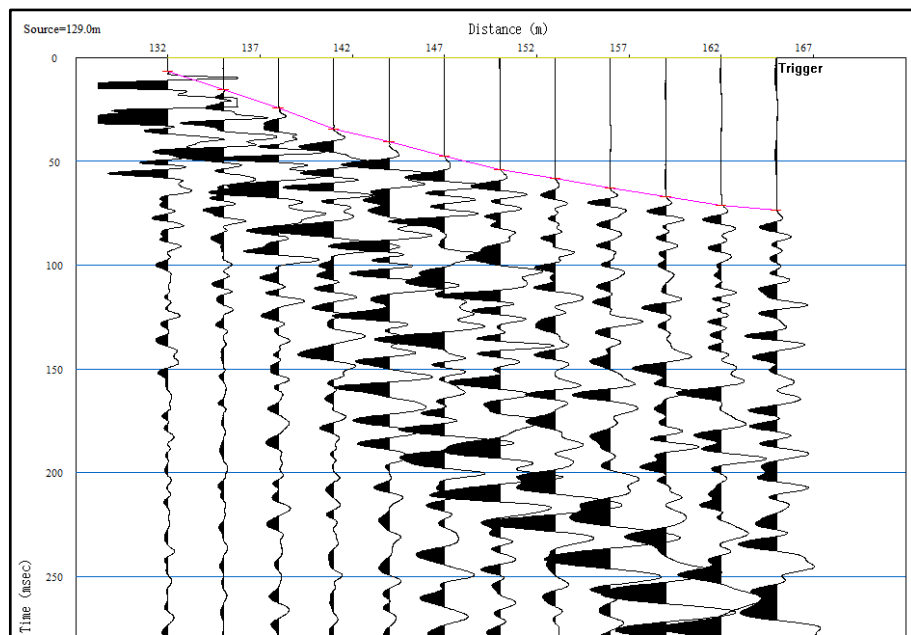
Se aplicó el paquete de SeisImager generado por Geometrics, casa que fabricó el equipo de adquisición usado en este estudio. El paquete está conformado por cuatro módulos los cuales son Pickwin, Plotrefa, WaveEq, Geoplot.

4.2.2.1. Selección de primeras llegadas

El módulo utilizado para este proceso es el Pickwin. Esta selección se basa en la determinación de la primera perturbación registrada, asociada a la señal sísmica para cada canal (geófono) en el registro sísmico. Esta perturbación se reconoce como la primera alza y descenso en la amplitud de la señal sísmica (figura 26).

Figura 26

Selección de primeras llegadas del perfil sísmico (color rojo). Registro sísmico de la línea sísmica RS07 visualizado en el software Seislmager. La línea magenta indica el registro de las primeras llegadas para cada geófono



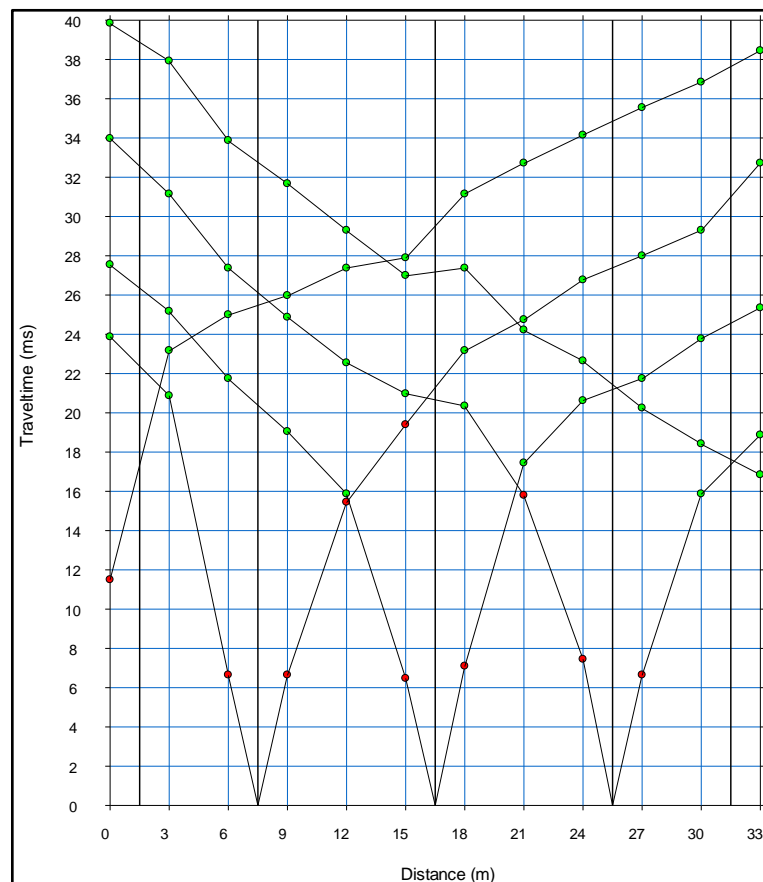
El programa puede seleccionar las primeras llegadas de manera automática y manual, para este trabajo se optó realizar el método manual de selección.

Los puntos seleccionados como primeras llegadas representan la primera perturbación en un tiempo y distancia determinada del punto de disparo.

Posterior a la selección de las primeras llegadas para los tres registros se grabó dicha selección de las primeras llegadas, para posteriormente ser abierta con el módulo Plotrefa (figura 27).

Figura 27

Gráfico de primeras llegadas de una línea de refracción sísmica. Primeras llegadas visualizadas como domocronas, curva distancia-tiempo, en el software Seislmager



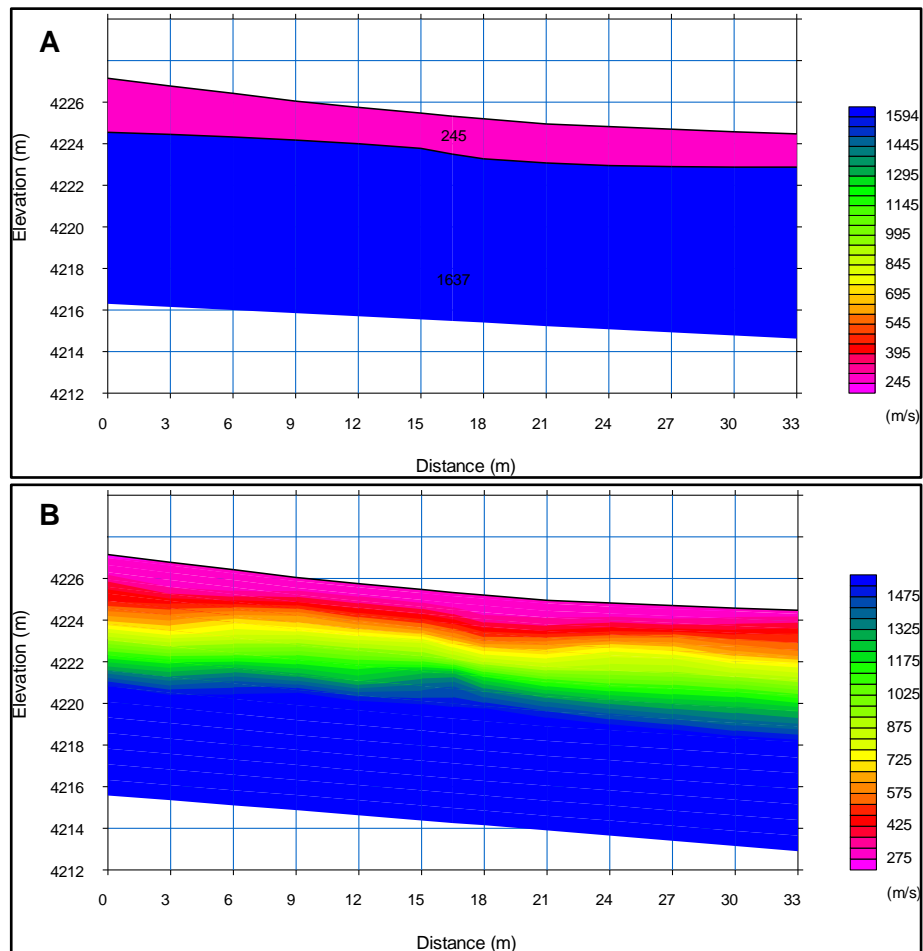
4.2.2.2. Inversión sísmica bajo la modalidad de tomografía sísmica

La finalidad de la inversión sísmica es generar un modelo que determina la variación lateral de la velocidad. Como modelo inicial se usa un modelo de capas realizado en el mismo programa, este modelo de capas nos ayuda a determinar

las Vp máximas que tienen los estratos del suelo (figura 28). Con el módulo Plotrefa obtenemos la tomografía sísmica de la línea, adicionalmente estos resultados se pueden guardar en formato txt para procesarlos en otros programas.

Figura 28

A) Modelo de capas. B) Modelo de tomografía sísmica. El modelo de capas es reflejo de la interpretación de domocronas, debido a la baja resolución por la cantidad de geófonos solo se muestran 2 capas. La tomografía sísmica mediante técnicas de inversión define 3 capas



4.3. ENSAYOS DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES

4.3.1. Adquisición de datos

Se realizó 11 puntos MASW con líneas de 33 m con 3 m de separación entre geófonos. Una de las ventajas fundamentales del método del MASW recae en la adquisición de los datos ya que se aplica el mismo equipo y arreglo de refracción sísmica.

En la tabla 9 se muestran las coordenadas de ubicación de cada ensayo MASW.

La ubicación de los ensayos MASW se puede apreciar en el Anexo 01C de “Distribución de Ensayos Geofísicos y Calicatas”.

Tabla 9

Coordenadas de los ensayos MASW en UTM WGS84

Línea Sísmica	Ensayo MASW	Este UTM	Norte UTM
RS01	MASW01	418 474	8 089 419
RS02	MASW02	418 439	8 089 447
RS03	MASW03	418 524	8 089 452
RS04	MASW04	418 551	8 089 320
RS05	MASW05	418 547	8 089 238
RS06	MASW06	418 604	8 089 193
RS07	MASW07	418 511	8 089 270
RS08	MASW08	418 495	8 089 244
RS09	MASW09	418 455	8 089 261
RS10	MASW10	418 490	8 089 268
RS11	MASW11	418 478	8 089 298

Se usaron 12 canales con geófonos de frecuencias de 4,5 Hz cuyos registros fueron grabados utilizando como fuente golpes de un martillo de 18 lb (fuente

activa) con una tasa de muestreo de 1 ms y 1 s para la longitud de registro. Se tomaron 4 registros con fuente activa para cada punto.

En la figura 29 se aprecia el uso de los geófonos de 4,5 Hz con la misma línea sísmica para el ensayo de refracción sísmica.

Figura 29

Fotografía de la adquisición de datos por MASW. Se visualiza el sismógrafo ES3000 y los geófonos rojos (4 Hz). Se observa el mismo arreglo de la línea sísmica aplicada para la refracción sísmica



4.3.2. Procesamiento de datos

Dentro del paquete SeisImager se encuentran los módulos Pickwin y WaveEq; estos fueron usados para el proceso de los registros en perfiles unidimensionales de Vs, los valores de Vs son calculados para el punto medio de las líneas sísmicas.

Usando el módulo Surface Wave Analysis Wizard cargamos los archivos sísmicos en el Pickwin para hacer el análisis espectral de los registros y obtener la curva de dispersión de ondas Rayleigh (figura 30), luego en el módulo WaveEq se hace el modelamiento de las ondas de corte (V_s), ver figura 31. También se pueden guardar en formato txt para procesarlo en otro programa de cómputo.

Figura 30

Análisis espectral de registros sísmicos y selección de curva de dispersión de ondas Rayleigh. Se observa el módulo fundamental de la curva de dispersión, también la presencia de módulos altos denotados de colores verde a naranja

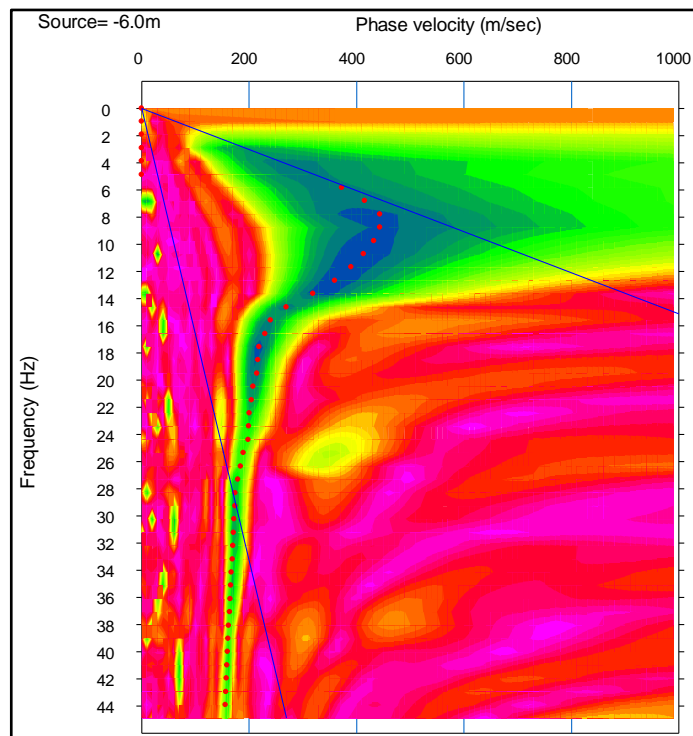
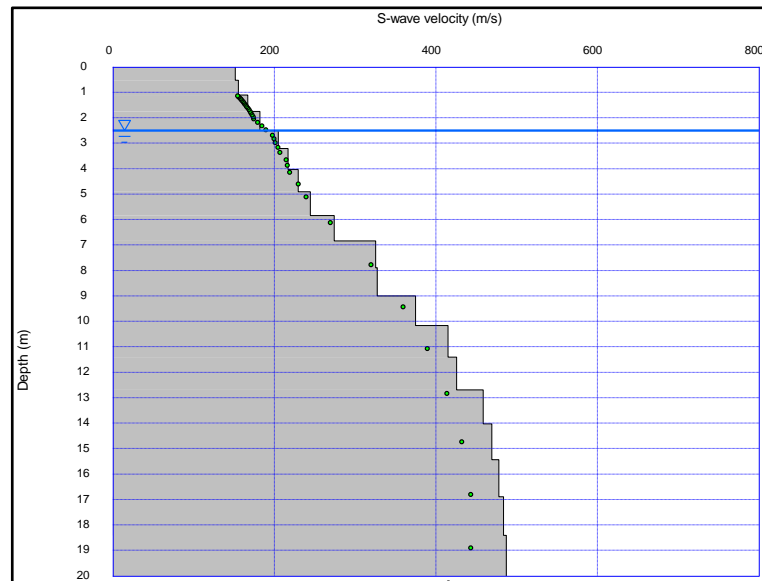


Figura 31

Modelamiento de las velocidades Vs. El modelo 1D de las velocidades Vs llega hasta 20 m de profundidad, debido a los parámetros aplicados en el ensayo



4.4. REGISTRO DE CALICATAS Y MECÁNICA DE SUELOS

De estudios pasados no se pudo hallar un registro, pero si una descripción de las calicatas ejecutadas PB-C-01 y LT-C-01.

En la calicata PB-C-01 se describe que de 0,00 a 0,20 m se observa arena limosa con presencia de materia orgánica, de 0,20 a 1,50 m arena mal gradada con presencia de finos sin gravas presentando continuidad. El nivel freático se encontró a 1,00 m de la calicata.

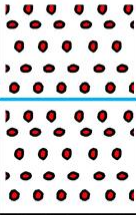
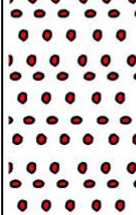
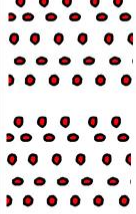
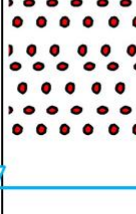


En la calicata LT-C-01, se registran arenas mal gradadas hasta 1,57 m y presentando continuidad; encontrándose el nivel freático también a esa profundidad.

Para este estudio se realizó una excavación (C-50) y una calicata (C-51), en ambas se pudo registrar como primer estrato arenas finas mal gradadas con presencia de material orgánico, en estado suelto correspondiente a los depósitos aluviales e indicando un nivel freático a 1,40 m y a 2,70 m respectivamente. En la excavación C-50 se halló a 2,90 m arenas gravosas, correspondiente a depósitos fluvioglaciares, con clastos subangulares a subredondeados con un diámetro máximo de 5 cm que representan un 30% del estrato hasta los 6,00 m presentando continuidad vertical y una compactación moderada.

En la figura 32 se muestran los registros correspondientes a las calicatas ejecutadas, donde se describe los estratos y se muestra el nivel freático.

Figura 32

A) Registro de la excavación C-50. B) Registro de la calicata C-51. Registros en diferentes escalas, se resalta el nivel freático

PROFUNDIDAD (E)	CLASIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN DE ESTRATOS	A	PROFUNDIDAD (E)	CLASIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN DE ESTRATOS	B
	SIMBOLOS	GRAFICO				SIMBOLOS	GRAFICO		
1.40	SP		Arena fina color gris claro. Compacidad suelta. Presencia de clastos de toba menores a 1 cm..					Arena fina color gris claro. Compacidad suelta. Presencia de clastos de toba menores a 1 cm..	
2.90									
	SP		Arena media a gruesa con una presencia de gravas del 30%. Fragmentos subangulosos a subredondeados con diámetro máximo de 5 cm. y parcialmente cementada por óxidos.						
6.00					2.70				
									

En la tabla 10 se muestran las coordenadas de las calicatas en mención.

La ubicación de las calicatas se puede apreciar en el Anexo 01C de “Distribución de Ensayos Geofísicos y Calicatas”.

Tabla 10

Coordenadas de calicatas en el sistema UTM WGS84

Calicata	Este UTM	Norte UTM
PB-C-01	418 514	8 089 325
LT-C-01	418 439	8 089 317
C-50	418 504	8 089 285
C-51	418 519	8 089 254

4.4.1. Trabajo de Laboratorio

Los ensayos de mecánica de suelos fueron realizados por un servicio externo al estudio, el autor tuvo accesos a los resultados y fueron revisados para su conformidad. Para el primer estrato correspondiente a depósitos aluviales se realizó ensayos de densidad in situ, granulometría, humedad y densidad relativa. Para los depósitos fluvioglaciares (arenas gravosas) solo se realizó ensayos de granulometría y humedad por la dificultad que presentaba realizar ensayos in situ.

4.5. PROCESAMIENTO DE DATOS E INTERPRETACIÓN

4.5.1. Tratamiento de la información de campo

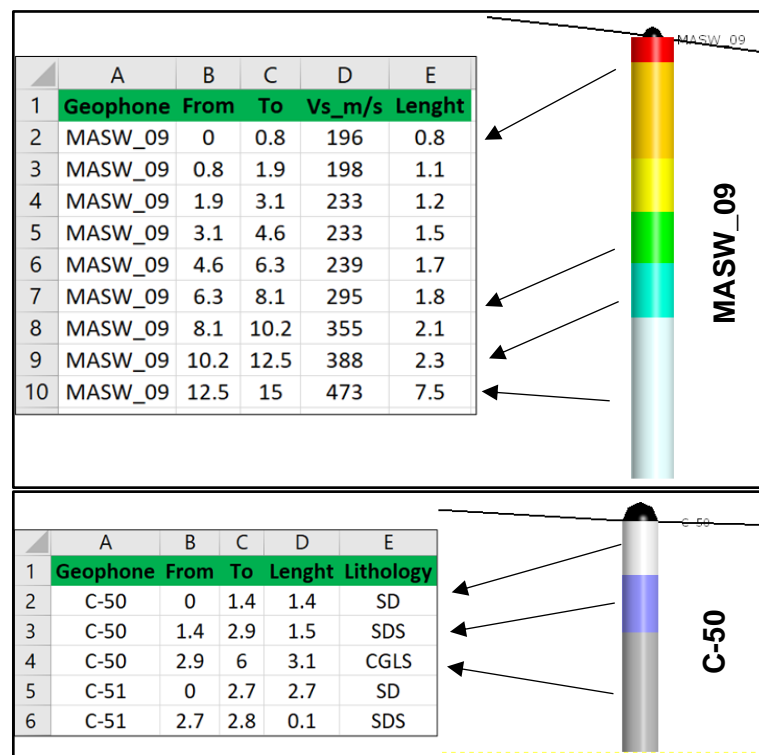
La información de campo consta de los datos obtenidos de la prospección sísmica, las calicatas realizadas y el cartografiado geológico; los cuales deben ser integrados para la interpretación del subsuelo. Para realizar esto es necesario que la información tenga un solo formato para su despliegue en un software de modelamiento 3D.

Para los datos geofísicos y calicatas se dio un formato de sondaje porque representan información en un punto del área de estudio; en el caso de la geofísica cada geófono se consideró como un sondaje. Por lo tanto, fue necesario obtener

la coordenada de cada geófono y ajustar su elevación al levantamiento topográfico, para esto se empleó herramientas GIS que facilitaron estos procesos. Al finalizar se obtuvieron variables numéricas correspondiente a la geofísica y variables categóricas (cualitativa) de las calicatas (figura 33).

Figura 33

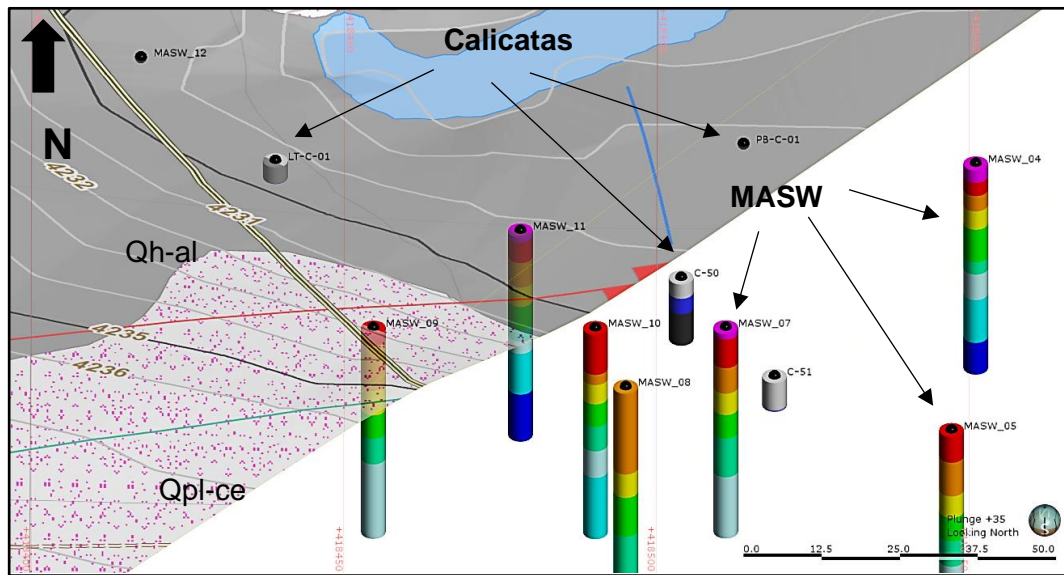
Base de datos con formato de sondaje para los geófonos y calicatas. Adicional a los datos categóricos y continuos, se debe realizar otra tabla con la ubicación de cada geófono y calicatas, indicando una dirección vertical sin desviación



En caso del cartografiado geológico se georreferenció para su despliegue con los datos geofísicos y calicatas. Esta integración lo podemos observar en la figura 34, donde se muestran los ensayos MASW (velocidad Vs), las calicatas indicando los estratos descritos y el cartografiado geológico local como superficie.

Figura 34

Visualización 3D del cartografiado geológico, geofísica y calicatas. Vista al norte de la integración de información a una plataforma para modelamiento



4.5.2. Interpretación geológica y geofísica

Previo al modelamiento se interpretaron las líneas de refracción sísmica de forma independiente las cuales fueron guía para la interpretación de secciones de mayor longitud que integraron los ensayos de MASW. Se realizaron 4 secciones mayores denominadas como AA', BB', CC' y DD' cuya ubicación se puede observar en la figura 35 donde también se despliegan los ensayos geofísicos y calicatas. Para la interpretación geofísica se aplicaron límites referenciales de las V_p para discretizar preliminarmente los distintos estratos. Las tablas 11; 12 y 13 son los valores que se tomaron como referencia. Las V_p fueron determinantes para definir la potencia de los estratos por el aumento gradual de la densidad de los depósitos aluviales a los depósitos fluvioglaciares.

Tabla 11*Rango usual de velocidades para los materiales geológicos*

Material	Vp (m/s)
Material superficial (capa de alteración de suelos y rocas)	305 – 610
Grava, arena y arcillas (secas y húmedas)	468 – 915
Arena húmeda	610 – 1830
Areniscas y lutitas	1830 – 4270
Caliza	2140 – 6100
Granito	4580 – 5800
Rocas Metamórficas	3050 – 7020

Fuente: Geofísica Aplicada en los Proyectos Básicos de Ingeniería Civil (Manilla et al., 2003).

Tabla 12*Correlación de Velocidad de ondas P y tipo de suelo, según ASTM D 5777-95*

Descripción	Vp (m/s)
Arena suelta sobre el manto freático	245 – 610
Suelo blando	< 300
Arena suelta bajo el manto freático	45 – 1220
Arenas y gravas	300 – 1000
Arena suelta mezclada con grava húmeda	455 – 1065
Rocas blandas, grava y arena compacta	1000 – 2000
Grava suelta, húmeda	455 – 915
Roca compacta	2000 – 4000
Roca muy compacta	> 4000

Fuente: IX COINEC Aplicaciones de la Geofísica en la Ingeniería Geotécnica (Alva Hurtado, 2013).

Tabla 13

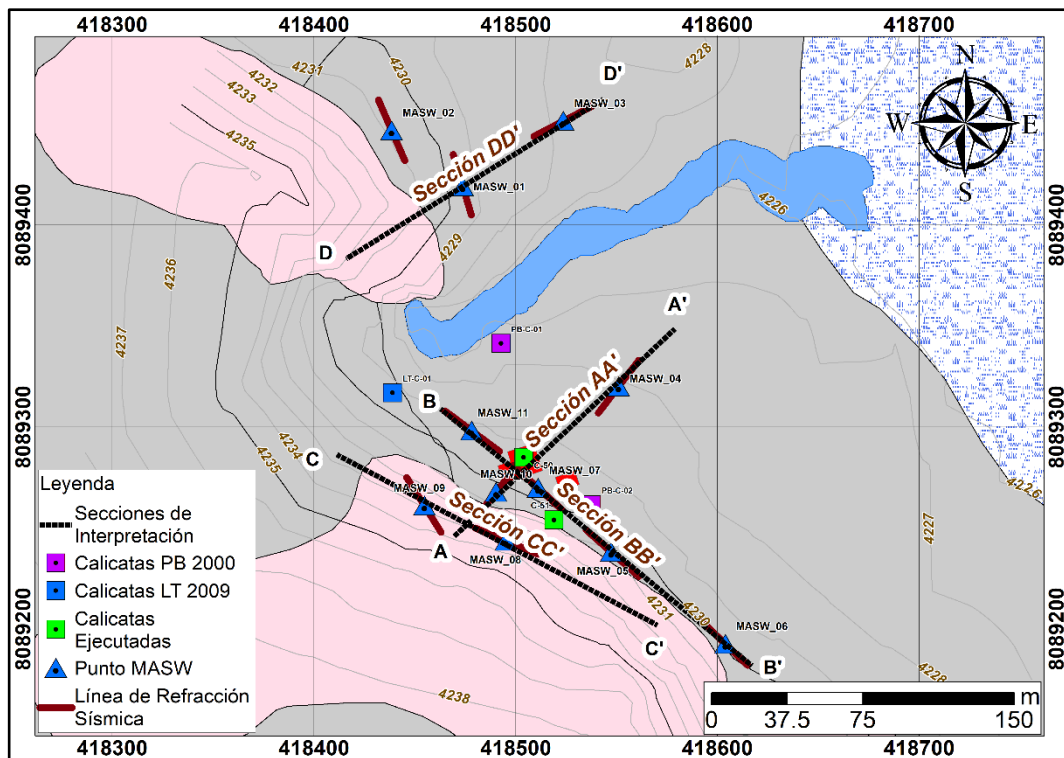
Correlación de Velocidad de ondas P y tipo de suelo, según ASTM D 5777-95

Descripción	Vp (m/s)
Suelo intemperizado	204 – 610
Grava o arena seca	460 – 915
Arena saturada	1220 – 1830
Roca metamórfica	3050 – 7000

Fuente: IX COINEC Aplicaciones de la Geofísica en la Ingeniería Geotécnica (Alva Hurtado, 2013).

Figura 35

Ubicación de las secciones mayores interpretadas. Plano elaborado en el sistema de coordenadas UTM WGS84



En la tabla 14 se muestran valores de Vs de referencia para la clasificación de suelos según la norma sismorresistente NE030 la cual se aplicó para el presente trabajo.

Tabla 14

Valores típicos de Vs para perfiles de suelo

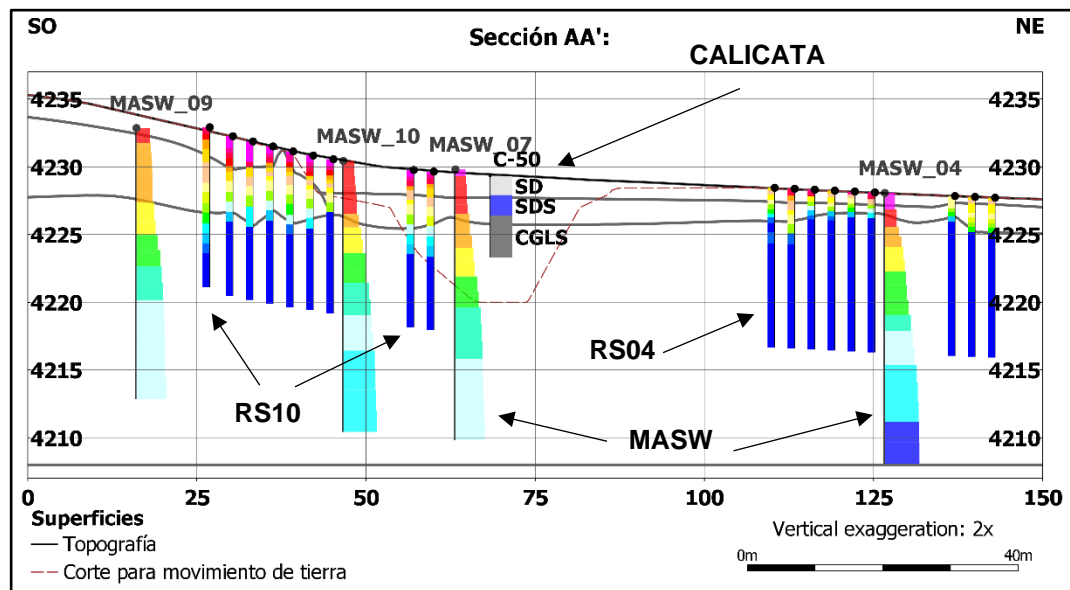
Perfil	Vs (m/s)
Roca dura	>1500
Roca o suelos muy rígidos	500 - 1500
Suelos medianamente rígidos	180 - 500
Suelos blandos	<180

Fuente: Norma técnica N.E030 Diseño Sismorresistente.

En la figura 36 se observa la sección AA' donde se despliega toda la información que se empleó para la interpretación, este mismo formato se aplicó con las otras secciones. También se puede observar que el cambio de las Vs tiene congruencia en el límite de los estratos de arena aluvial y arena gravosa fluvio-glacial.

Figura 36

Sección de interpretación geológica con escala vertical exagerada y datos de refracción sísmica y MASW. Sección procesada en software de modelamiento 3D



CAPÍTULO V

MODELAMIENTO Y ANÁLISIS GEOTÉCNICO

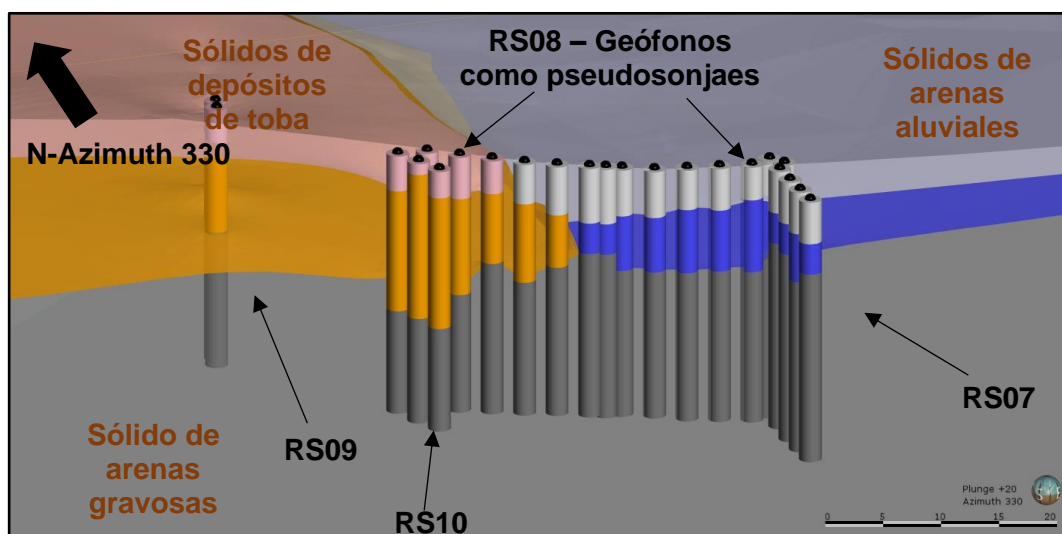
5.1. MODELAMIENTO

5.1.1. Modelamiento geológico

Para el modelamiento geológico se aplicó el método implícito, para ello en la interpretación de la prospección sísmica (refracción y MASW) se asignó a los pseudosondajes (geófonos) los datos categóricos correspondientes a los estratos para luego realizar la interpolación de superficies de contacto junto a las calicatas. Estas superficies definirán la forma de los sólidos litológicos o estratos; en la figura 37 podemos ver un ejemplo de lo descrito donde se observa como el método implícito es congruente con los contactos definidos en los pseudosondajes.

Figura 37

Sólidos litológicos creados por modelamiento implícito y pseudosondajes con datos categóricos de estratos. Vista al noroeste de la sección de la línea sísmica RS08, la sección tiene una longitud de influencia para mostrar más información, mientras que los sólidos presentan el sector posterior del corte

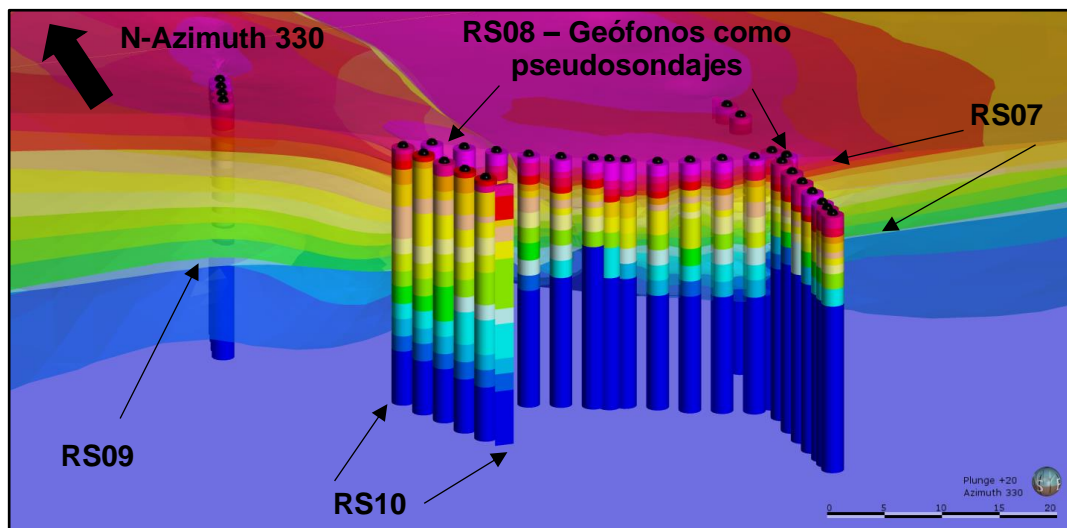


5.1.2. Interpolación 3D de datos geofísicos

Con los datos geofísicos se realizó una interpolación 3D con el método del inverso de la distancia para generar isosuperficies de las V_p y V_s . Las isosuperficies tienen como límite los sólidos litológicos y se aplicó una tendencia horizontal para la interpolación en la dirección X e Y porque que los estratos no presentan deformación y son horizontales. En la figura 38 se observa lo descrito donde se muestran los geófonos en forma de pseudosondajes con los resultados de V_p . De la misma manera se realizó la interpolación de los resultados de los ensayos MASW.

Figura 38

Isosuperficies generadas por la interpolación de las V_p . Perspectiva hacia la dirección norte y corte de las isosuperficies paralela a la línea RS08



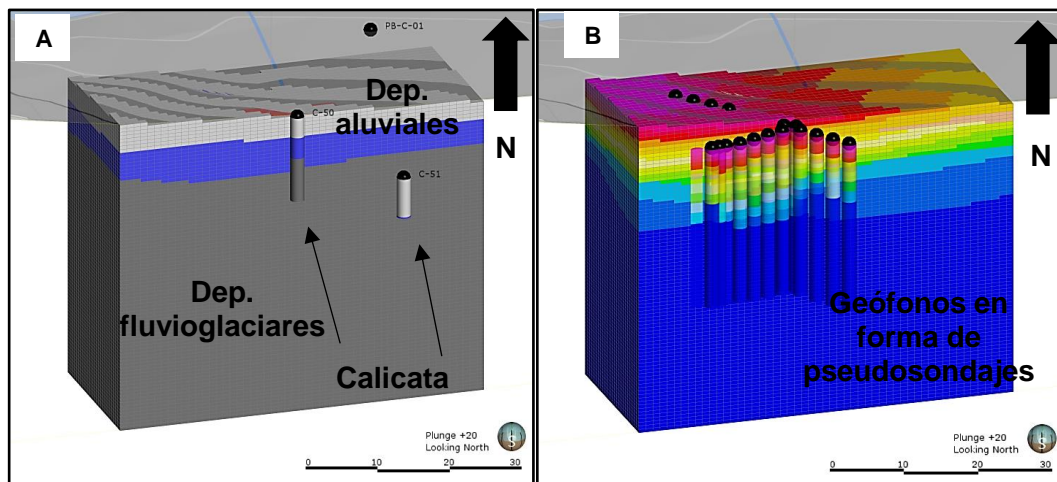
5.1.3. Modelo integrado de bloques

Para la caracterización geotécnica en un modelo de bloques se integró las interpolaciones de V_p y V_s con el modelo geológico, es decir cada unidad de bloque tendrá estos datos (figura 39).

Los bloques nos permitirán calcular los parámetros elástico dinámicos y de resistencia de los estratos en toda la extensión del modelo, lo cual nos permitirá realizar una evaluación del área de emplazamiento para la planta de bombeo.

Figura 39

A) Modelo de bloques categorizado por estratos. B) Modelo de bloques para la interpolación de V_p . Vista al norte del modelo de bloques. Se trata de un solo modelo con diferentes atributos



5.2. CÁLCULO DE PARÁMETROS ELÁSTICO DINÁMICOS, DENSIDAD RELATIVA Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EMPÍRICO

Para realizar estos cálculos se exportó los datos del modelo de bloques a una hoja de cálculo Excel (figura 40).

Figura 40

Hoja de cálculo para los parámetros elásticos de cada bloque. Las fórmulas se aplicaron a cada bloque del modelo generando una base de datos georreferenciada

	H	I	K	M	N	P	Q
1	Vp_m_s	Vs_m_s	Density (KN_m3)	Poison (v)	Gmax_Mpa	Emax_Mpa	E_Mpa
2	1670	=ROUND(I2+H2*0.002;3)		4	$\rho_p = \rho_0 + 0.002V_p$		4.7
3	1670						4.4

	H	I	K	M	N	P	R
1	Vp_m_s	Vs_m_s	Density (KN_m3)	Poison (v)	Gmax_Mpa	Emax_Mpa	Bulk (K)
2	1670	520.36	20.34	=ROUND((L2*POWER(I2;2))/1000;3)			5033
3	1670	520.08	20.34				5033.8

	H	I	K	M	N	P	R
1	$v = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$		Density (KN_m3)	Poison (v)	Gmax_Mpa	Emax_Mpa	Bulk (K)
2					$\left(\frac{\text{POWER}((H2/I2);2)-2}{(2*\text{POWER}((H2/I2);2)-2)}\right);6$		5033
3							5033.8

Parte de la metodología de trabajo es la comparación de resultados empíricos y ensayos de laboratorio. En este caso se disponía de ensayos de densidad in situ y densidad relativa (Dr) de la muestra de calicata C-51 extraída a 2 m de profundidad. Para la densidad relativa se comparó con las correlaciones definidas por los diferentes autores ya citados donde el valor más cercano y conservador fue aplicado en el modelo.

Luego de analizar los resultados se determina que la correlación de Ohta y Goto (tabla 3) se ajusta mejor al obtenido en laboratorio y es más conservador, de la misma manera se tiene un dato más conservador en la densidad in situ (tabla 15). Siendo estos resultados dependientes de las Vp y Vs podemos tener certeza de los resultados producto de las correlaciones.

Tabla 15

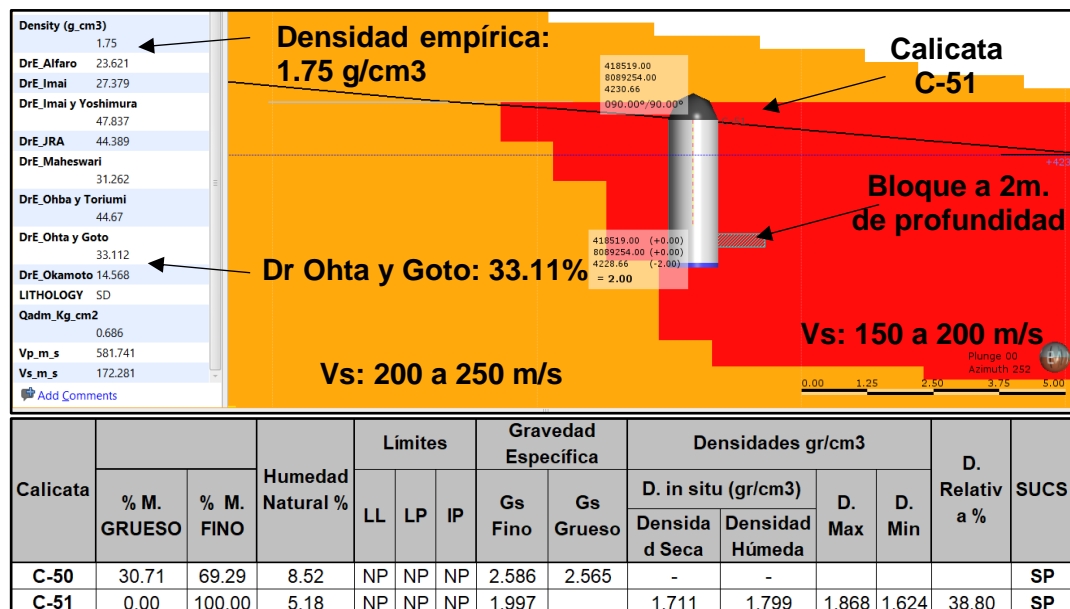
Comparación de correlaciones empíricas y ensayos para la densidad y densidad relativa. Se aplicó la correlación inversa entre NSPT y Vs para el cálculo posterior de Dr

	Densidad g/cm ³	Dr Ohta y Goto	Dr Ohba y Torlumi	Dr Maheswari	Dr JRA	Dr Imai
Empírico	1,750	33,11	44,67	31,26	44,39	27,38
Ensayos	1,799	38,80	38,80	38,80	38,80	38,80
Error	-2,7%	-14,7%	15,1%	-19,4%	14,4%	-29,4%

En la figura 41 se muestra cómo se obtuvo los datos para la comparación de la tabla 15, donde se muestra la calicata C-51 y el modelo de bloques diferenciado en 2 zonas según la velocidad Vs. Se tomó los resultados de un bloque ubicado a 2 m de profundidad junto a la calicata donde la muestra fue extraída.

Figura 41

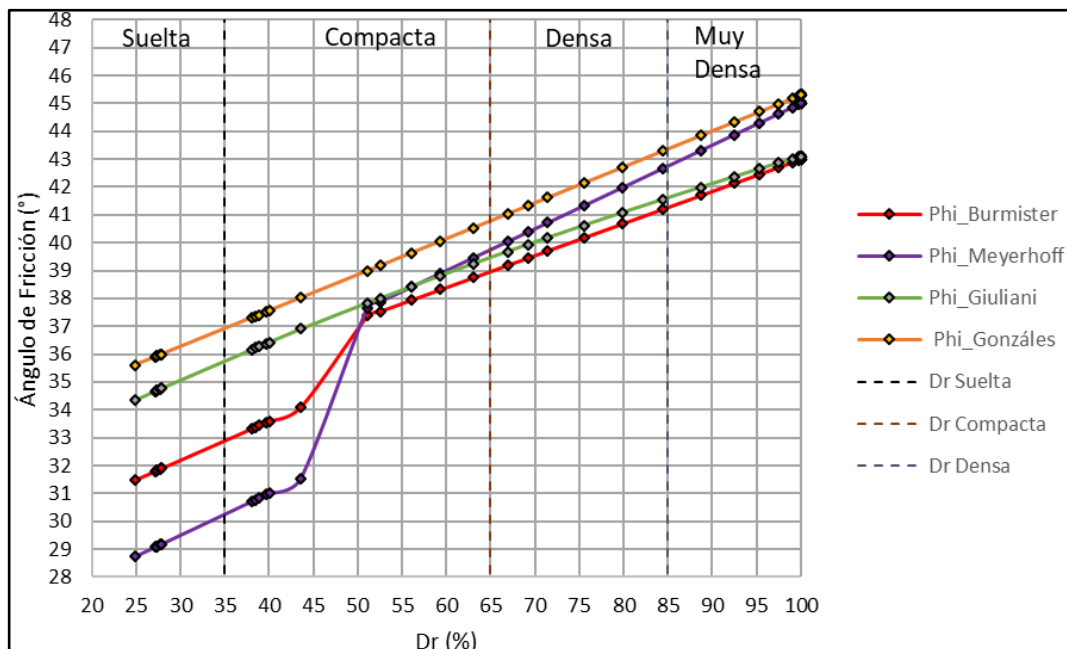
Comparación de resultados de laboratorio y correlaciones empíricas. La tabla a la izquierda muestra todos los datos que contiene el bloque seleccionado



En el caso del ángulo de fricción también se realizó la comparación con las correlaciones de los diferentes autores citados en el apartado 2.6 del Marco Teórico (figura 42). Estos resultados se analizaron y se determina que el más conservador para valores altos de densidad relativa es el de Burmister (tabla 6) que fue aplicado para el estrato de arenas gravosas que se clasifica como una arena media a gruesa muy densa. Los estratos arenas aluviales se clasifican como arenas finas y poseen 4,78% de limos, por lo cual se aplicó la correlación de Meyerhoff (tabla 6) a estos estratos. Los resultados obtenidos se compararon con los valores típicos de la tabla 6 concluyendo estos como aceptables.

Figura 42

Comparación de resultados para las correlaciones de densidad relativa y ángulo de fricción. Esta comparación se realizó con todos los datos del modelo de bloques



Con respecto con las unidades de medida de los cálculos se realizaron conversiones con respecto a la densidad y módulo de corte del cual deriva el módulo de elasticidad. A continuación, se detalla el cálculo para la conversión de unidades de kilonewton por metro cúbico (KN/m³) a gramos por centímetro cúbico (g/cm³).

$$\frac{\text{KN}}{\text{m}^3} = \frac{10^3(\text{Kg} \cdot g')}{(100\text{cm})^3} = \frac{10^3(10^3 \cdot g)g'}{10^6\text{cm}^3} = \frac{g}{\text{cm}^3} \cdot \text{gravedad} \quad (17)$$

Donde g' representa la gravedad y nos indica que para el cambio de unidad solo debemos dividir el resultado por el valor de la gravedad.

Otro cambio de unidad realizado es del módulo de corte y elasticidad cuyo resultado lo obtenemos en megapascales (MPa) y para el cálculo de asentamientos lo aplicamos como kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm²).

$$\text{MPa} = 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10^6 \frac{\text{kg} \cdot g'}{(100\text{cm})^2} = 10^6 \frac{\text{kg} \cdot g'}{10^4\text{cm}^2} = 100 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot \text{gravedad} \quad (18)$$

5.3. ANÁLISIS GEOTÉCNICO

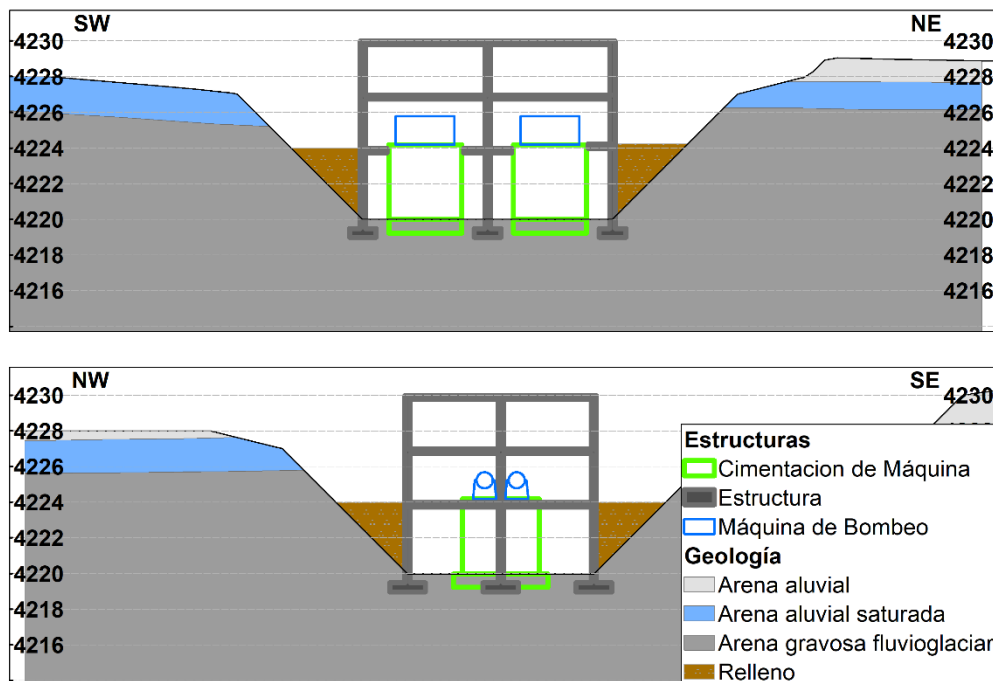
5.3.1. Esquema de la cimentación de la estación de bombeo y máquinas

Con los parámetros calculados podemos realizar una caracterización geotécnica relativa del área de estudio, para que esta pueda ser considerada favorable o no debemos realizar una evaluación integrando el emplazamiento de la planta de bombeo. Por ello se plantearon 2 escenarios según el tipo de cimentación. Esto nos ayudó a saber a qué cota debemos evaluar la capacidad portante del suelo y asentamientos.

La planta de bombeo por la profundidad de corte se plantea con 3 niveles, 1 sótano y 2 pisos. La primera propuesta trata de aplicar una cimentación tipo bloque rígido (figura 43) para las máquinas de bombeo, junto a zapatas aisladas. Los bloques propuestos tienen una dimensión 4,10x5,30 m y 1,50x1,50 m para las zapatas individuales.

Figura 43

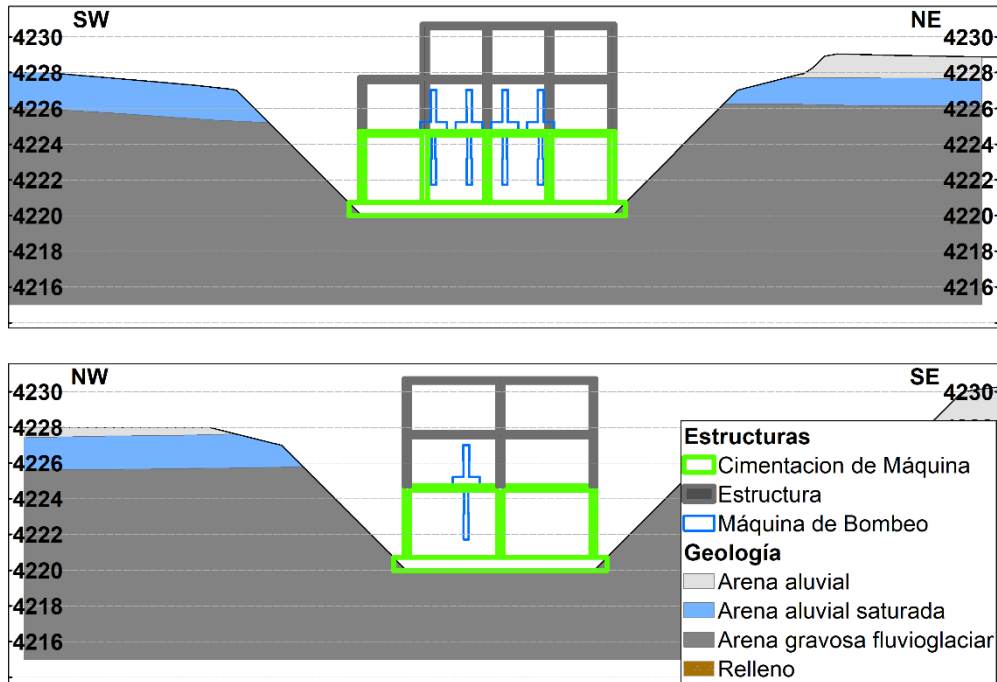
Esquema de la propuesta para la cimentación tipo bloque y zapatas. Sección longitudinal y transversal del área de emplazamiento sin exageración vertical



La segunda propuesta es una losa de cimentación que cumpliría también la función de cimentación para las máquinas (figura 44). La losa de cimentación tiene una dimensión de 12,00x15,50 m y su fin de aplicación se da para no sobredimensionar las zapatas de la primera propuesta.

Figura 44

Esquema de la propuesta para la cimentación tipo pórtico y losa de cimentación. Sección longitudinal y transversal del área de emplazamiento sin exageración vertical

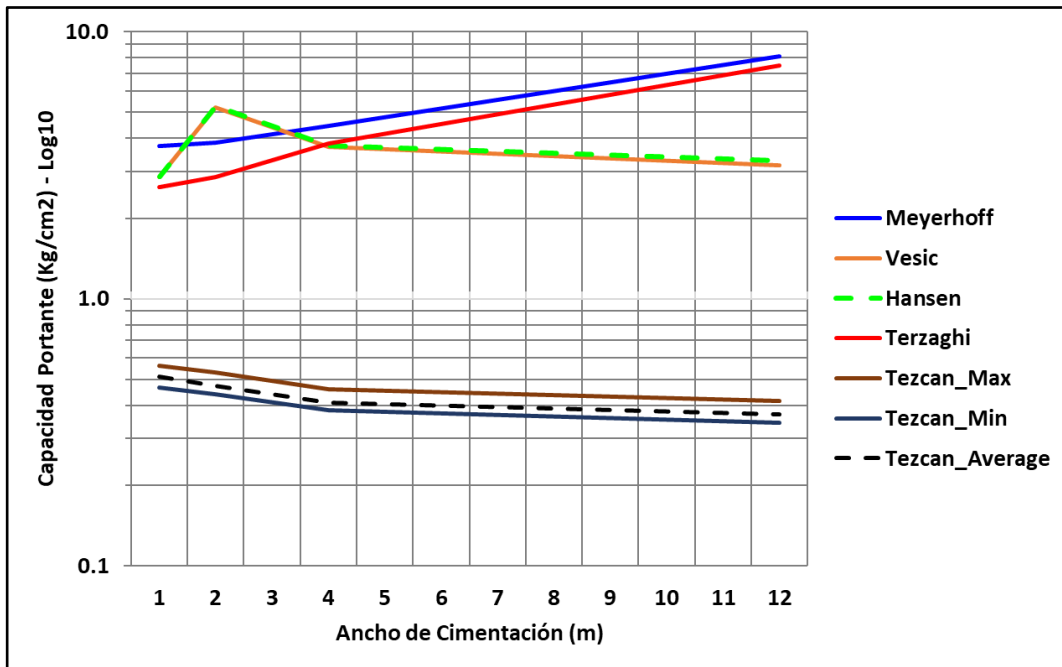


5.3.2. Cálculo de la capacidad portante

La capacidad portante se calculó con la ecuación de Tezcan (2006) aplicado a suelos, y gracias a la base de datos del modelo de bloques se puede calcular datos estadísticos según a una cota determinada. Los resultados se compararon con el cálculo por métodos clásicos aplicando los ensayos de laboratorio, como la densidad in situ, la densidad relativa para los depósitos aluviales y considerando un factor de seguridad igual a 3. Se realizó comparaciones de la capacidad portante para los depósitos aluviales para diferentes anchos de cimentación para verificar la eficacia de la metodología de Tezcan lo cual podemos observar en la figura 45.

Figura 45

Comparación entre los métodos de cálculo clásicos y de Tezcan para la capacidad portante del suelo con diferentes anchos de cimentación para la arena aluvial seca. Para esta comparación se aplicaron todos los datos correspondientes a las arenas aluviales



Los resultados fueron comparados con las cargas que transmitirán cada elemento de la cimentación para definir el tipo de cimentación a aplicar.

Con respecto a las unidades de medida, la metodología de Tezcan calcula la capacidad portante en kilonewton por metro cuadrado (kN/m²), pero realizaremos una conversión a kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm²) por ser una unidad con mayor aplicación, el cálculo de cambio de unidad es el siguiente.

$$\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = \frac{10^3(\text{kg} \cdot \text{g}')} {(100\text{cm})^2} = \frac{10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{g}'} {10^4\text{cm}^2} = \frac{1}{10} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot \text{gravedad} \quad (28)$$

5.3.3. Cálculo de asentamientos

Se aplicó el cálculo de asentamientos en suelos granulares para definir la deformación del suelo por cada tipo de cimentación propuesta. La metodología de cálculo usada es la señalada en el apartado 2.7 del Marco Teórico. Pese a ser un mismo estrato de arena gravosa se discretiza cada 1 m. para considerar el aumento gradual del módulo de elasticidad con respecto a la profundidad.

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. RESULTADOS DE LA PROSPECCIÓN SÍSMICA

En la figura 46 y 47 se observa los resultados de refracción sísmica de la línea RS07 y RS10 ubicadas en el sector sur del área de estudio. Ambas líneas indican la presencia de 3 capas con espesores variables que se detallan en la tabla 16.

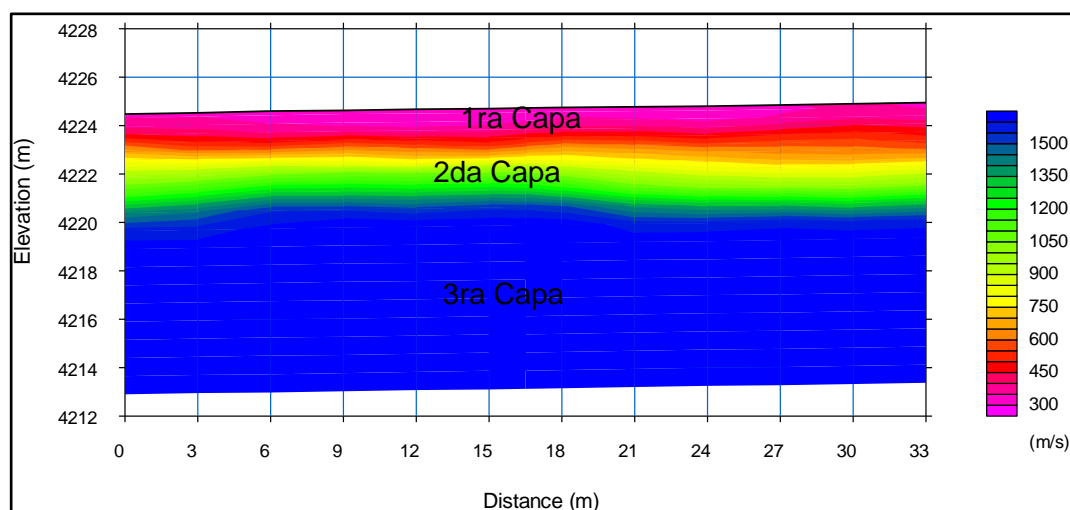
Tabla 16

Capas determinadas por la refracción sísmica. Rangos de velocidad obtenidos por la tomografía sísmica

	Espesor (m)	Vp (m/s)
1era Capa	1,8-2,2	<650
2da Capa	2,0-2,1	650 - 1250
3era Capa	>6,5	1250 - 1600

Figura 46

Sección correspondiente a la tomografía sísmica de la línea RS07. Sección procesada en el software Seislmager

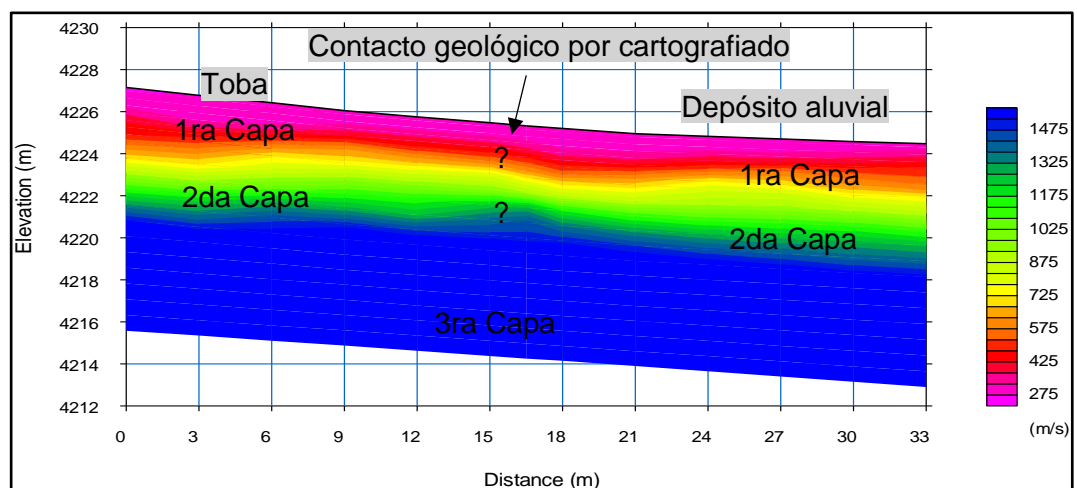


En la sección de la línea RS07 mediante el cartografiado y las calicatas se puede definir que la primera capa corresponde a depósitos aluviales, la segunda capa a estos depósitos saturados y la tercera a depósitos fluvioglaciares.

En la línea RS10 se observa la presencia de 3 capas y el cartografiado nos indica una transición de toba y depósitos aluviales. En la tomografía sísmica no se observa bien el contraste entre estos estratos porque se estima que las densidades son similares, además en las tablas 8; 9 y 10 podemos ver que las Vp típicas de estos depósitos se encuentran en los mismos rangos. Estos contactos se determinarán por interpretación con la ayuda de una plataforma de modelamiento donde se puede discretizar mejor los datos de Vp. También se verifica que la toba no tiene continuidad en profundidad en este sector.

Figura 47

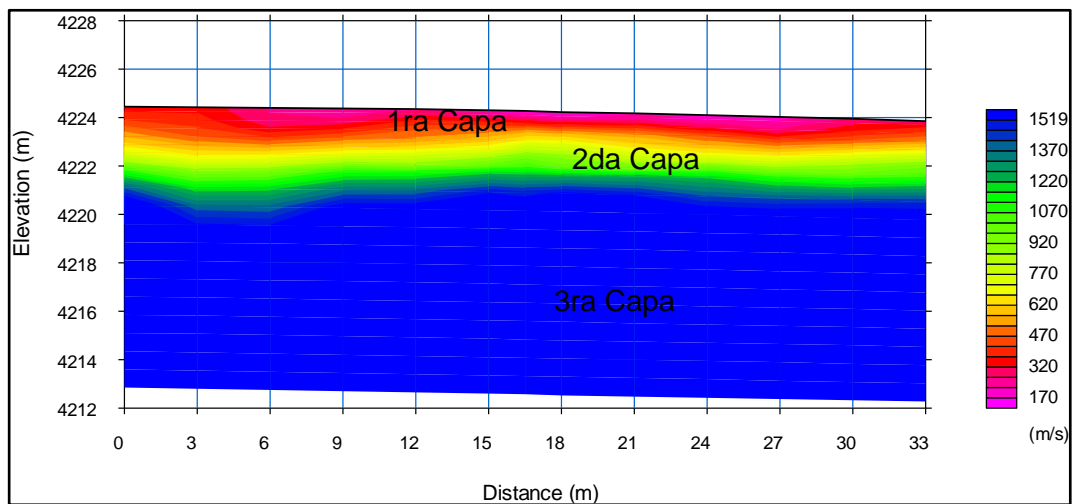
Sección correspondiente a la tomografía sísmica de la línea RS10. Sección procesada en el software SeisImager. La baja resolución de datos no muestra las diferencias o contacto entre tobas y arena aluvial



En la figura 48 se observa la tomografía sísmica de la línea RS01 ubicada en el sector norte del área de estudio, el fin de esta línea era verificar la continuidad lateral de los estratos del sector sur. Como se puede observar presenta las mismas distribuciones de Vp como en la línea RS07 lo cual junto al cartografiado podemos afirmar que hay una continuidad lateral de los estratos ya descritos.

Figura 48

Sección correspondiente a la tomografía sísmica de la línea RS01. Sección procesada en el software SeisImager



En la tabla 17 se observan los valores mínimos y máximos de cada línea de sísmica y casi todos tienen un mismo rango; esto nos indica la continuidad lateral y vertical de los mismos estratos. La línea RS01 que presenta una zona con mayor saturación o compactación del último estrato ubicado en el sector norte, esto se verificará con los datos de MASW.

Tabla 17

Valores mínimos y máximos de Vp en cada línea sísmica. Para cada línea sísmica se aplica el modelo de capas preliminar para acotar las velocidades máximas y mínimas

Línea Sísmica	Min Vp-m/s	Max Vp-m/s	Línea Sísmica	Min Vp-m/s	Max Vp-m/s
RS01	170	1645	RS07	300	1691
RS02	190	1679	RS08	320	1666
RS03	300	1832	RS09	300	1638
RS04	320	1688	RS10	275	1629
RS05	320	1669	RS11	220	1638
RS06	190	1582			

Los ensayos MASW alcanzaron una profundidad máxima de 20 m según los parámetros aplicados en la tabla 1. Estos resultados varían en profundidad como se puede observar en la tabla 18 y en la figura 49, donde se observa un aumento de la velocidad Vs y obteniendo los valores más altos en cotas más profundas.

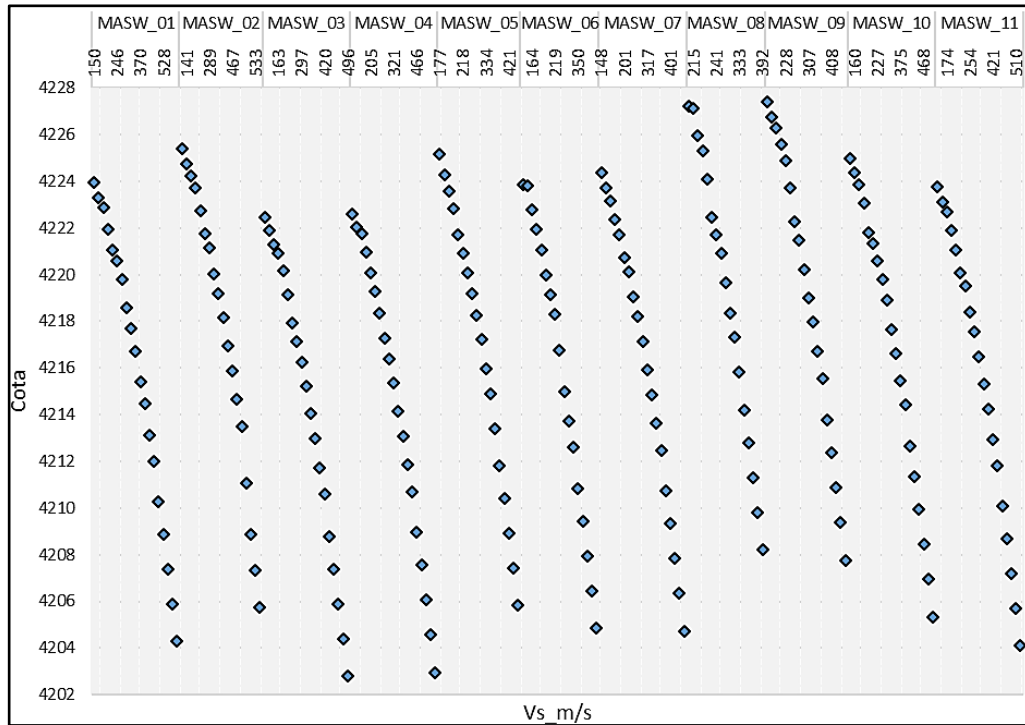
Tabla 18

Valores mínimos y máximos de las Vs en los ensayos MASW. La cota mínima hace referencia a la cota más profunda del registro de datos

Punto	Cota Min	Min Vs-m/s	Max Vs-m/s	Punto	Cota Min	Min Vs-m/s	Max Vs-m/s
MASW01	4 204,3	150	553	MASW07	4 204,7	148	427
MASW02	4 205,8	141	553	MASW08	4 208,2	214	392
MASW03	4 202,8	95	496	MASW09	4 207,8	198	442
MASW04	4 202,9	126	504	MASW10	4 205,3	158	490
MASW05	4 205,8	177	443	MASW11	4 204,1	149	510
MASW06	4 204,8	158	410				

Figura 49

Distribución de las velocidades Vs según su cota para cada ensayo MASW. En el gráfico también se observa la variación de la cota para cada ensayo MASW



Los resultados del MASW se dividieron en múltiples capas para considerar el aumento gradual de la compactación del último estrato y se vea reflejado en la interpolación 3D y la creación de modelos de bloques.

En la tabla 19 se muestran los rangos de velocidades que se encuentran los estratos del área de estudio, se puede observar que hay 4 puntos MASW que indicaron suelos rígidos que pueden interpretarse como la presencia de gravas arenosas a medida que se profundiza.

Tabla 19

Capas determinadas por el MASW. Clasificación según la norma sismorresistente N.E.030

	Espesor (m)	Vs (m/s)
Suelo Blando	1,1 – 4,1	<180
Suelo Moderadamente Rígido	8,0 – 20,0	180 - 500
Suelo Rígido	3,1 – 9,8	500 - 553

6.2. MODELO GEOLÓGICO, MODELO GEOFÍSICO Y MODELO DE BLOQUES

Interpretando las secciones se definieron 5 estratos para el modelo geológico, y se asignó un código arbitrario para el software de modelamiento. Los depósitos aluviales se dividieron en arena fina aluvial (SD) y arena aluvial fina saturada (SDS); los depósitos piroclásticos en toba dacítica intemperizada (ITD) y toba dacítica (TD); y depósitos fluvioglaciares de arena gravosa (CGLS), ver figura 50.

Figura 50

Sección AA' del sector sur y ensayos geofísicos. Sección procesada en software de modelamiento 3D. Se muestra el corte donde se proyecta la planta de bombeo

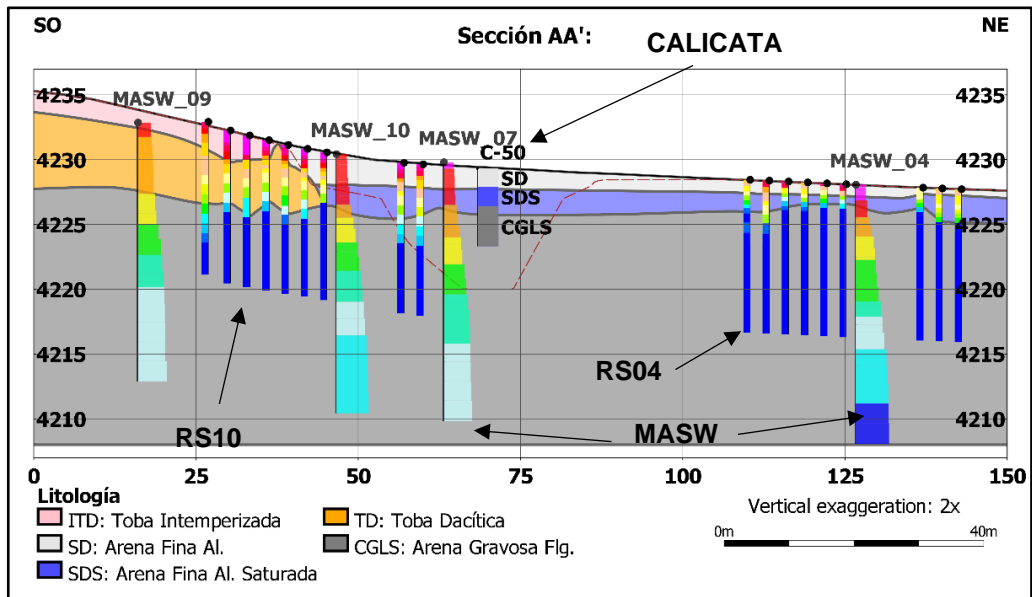
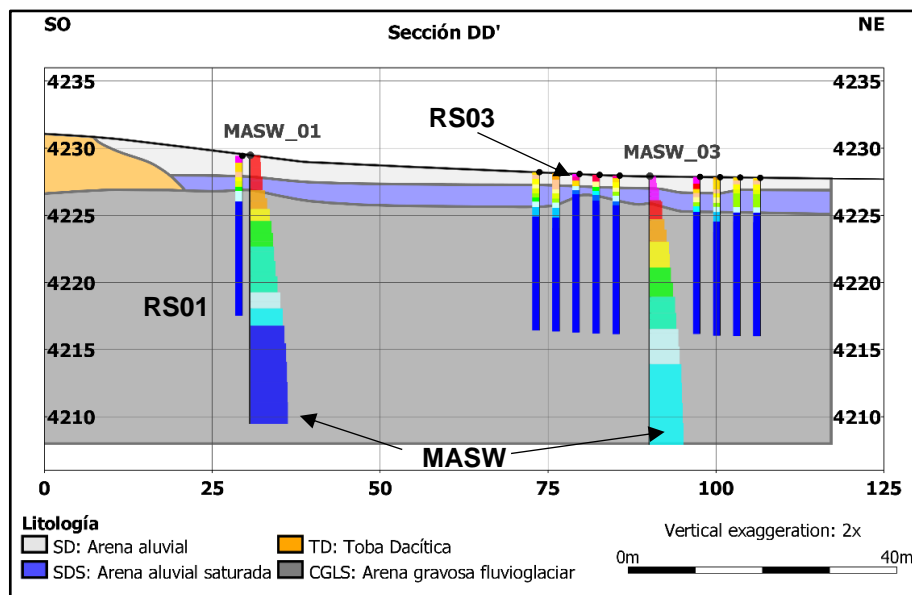


Figura 51

Sección DD' del sector norte y ensayos geofísicos. Los ensayos en el sector norte se realizaron para verificar la continuidad de los estratos identificados en el sector sur

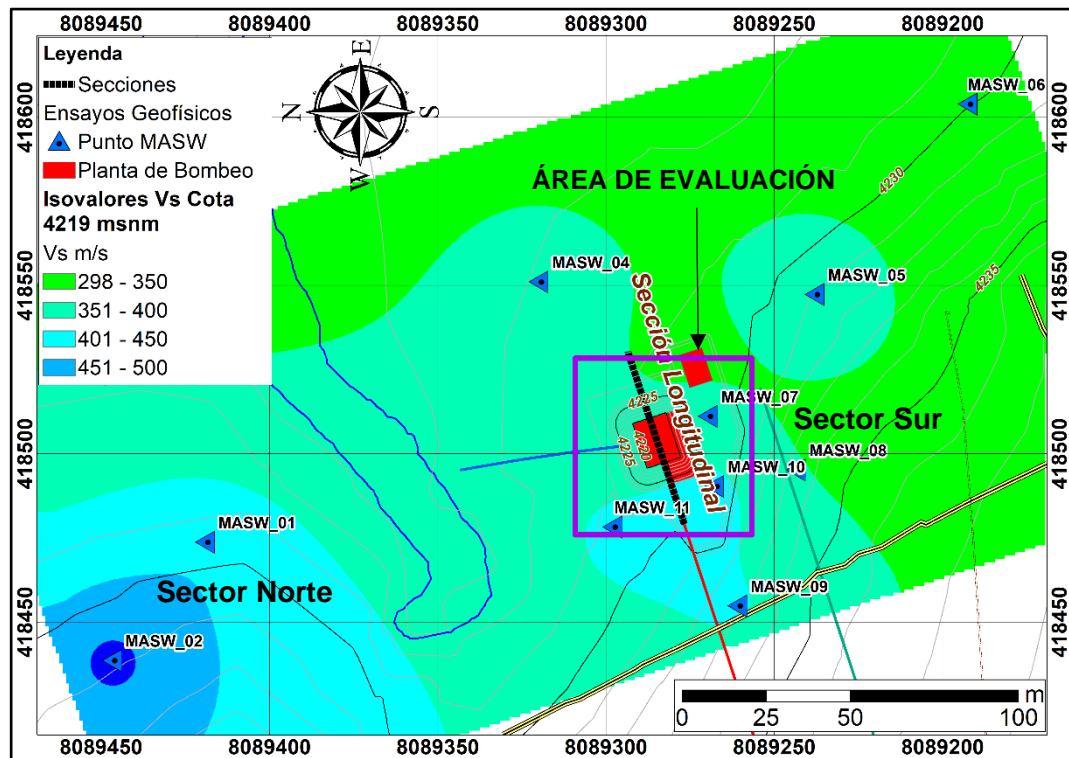


En la figura 51 muestra la interpretación del sector norte con el mismo esquema anterior, no se muestra la capa intemperizada de toba porque en este sector porque no se hicieron ensayos en este depósito.

Con los ensayos geofísicos en el sector norte se verificó la continuidad lateral de los estratos y dio certeza de no encontrar roca competente a una profundidad somera.

Figura 52

Corte o sección horizontal de la interpolación 3D de las Vs en la cota 4219



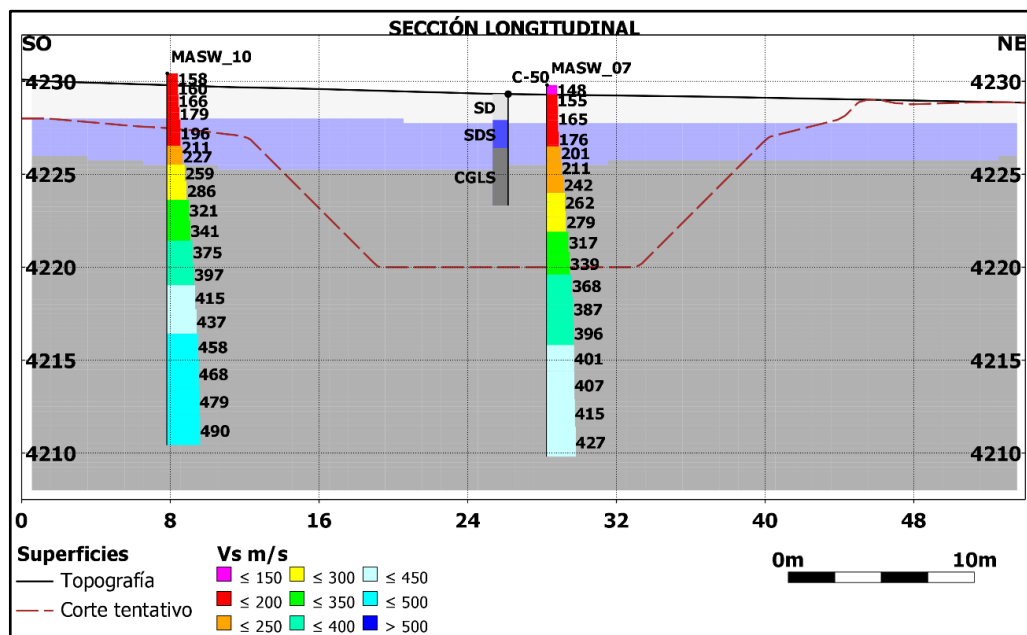
Con los datos de MASW se realizó una interpolación con el método de inverso a la distancia en la cota 4219, donde se emplazará la cimentación de la planta de bombeo. El área de emplazamiento presenta un suelo moderadamente rígido con

velocidades Vs entre 351 a 400 m/s (figura 52), aumentando en profundidad. Se presenta un suelo rígido con Vs>500 m/s a más de 10 m de la cota de emplazamiento (figura 53). En la figura 52 también se muestra el área de los límites del modelo de bloques para la caracterización geotécnica del área definida para el emplazamiento de la planta de bombeo.

En la figura 53 se muestra un corte longitudinal del área de evaluación con el modelo de bloques categorizados por estratos y con los datos del ensayo MASW para visualizar la variación de las Vs, nótese que en el área de evaluación se considera la arena fina aluvial, la arena fina aluvial saturada y la arena gravosa fluvioglaciár. Cada bloque tiene una dimensión de 1x1x0,25 m para ajustarse a la potencia de los estratos.

Figura 53

Modelo de bloques categorizado por estratos. Las calicatas y MASW se visualizan como sondajes proyectados en un radio de influencia para la sección



Gracias a esta base de datos se realizó la tabla 20 que muestra el resumen de los rangos y promedios de Vp y Vs para cada estrato según las interpolaciones. Estos datos muestran un indicio de los contrastes que tienen cada estrato con respecto a sus parámetros elástico dinámicos y de resistencia.

Tabla 20

Resumen de Vp y Vs por estrato. Resultados discretizados según los estratos interpretados en el área de estudio

Estratos	Min Vp- m/s	Max Vp-m/s	Media Vp-m/s	Min Vs-m/s	Max Vs-m/s	Media Vs-m/s
SD	216,13	700,00	482,67	148,11	178,61	160,10
SDS	550,00	1309,96	964,08	162,88	202,34	180,44
CGLS	1350,00	1670,00	1636,28	197,71	520,37	388,90

En la figura 54 y 55 se tienen al modelo de bloques indicando los valores de Vp y Vs categorizados por los rangos ya mostrados, demostrando que cada bloque posee las variables categóricas y numéricas.

Figura 54

Modelo de bloques de Vp. Esta clasificación del modelo de bloques es congruente con los rangos de velocidades determinadas en la refracción sísmica

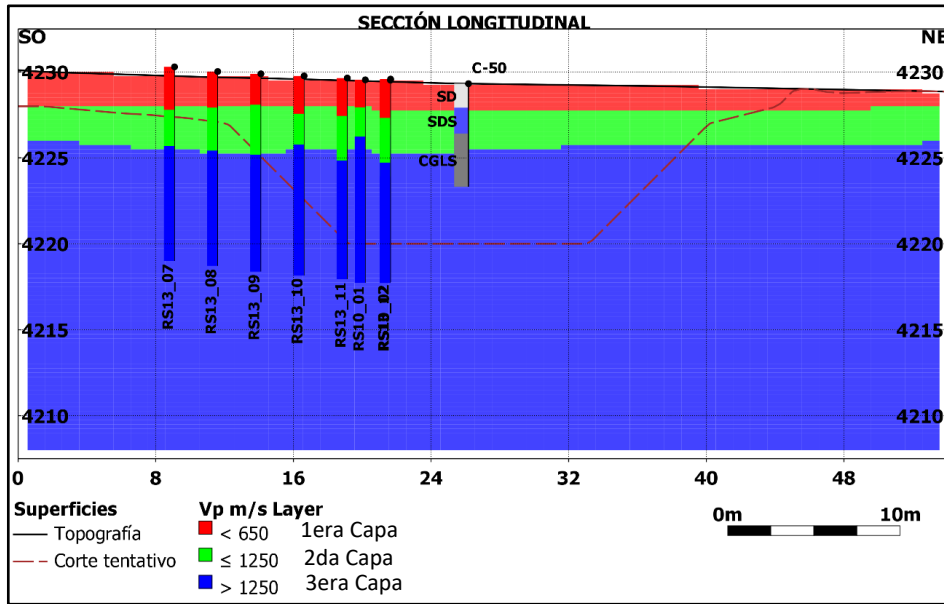
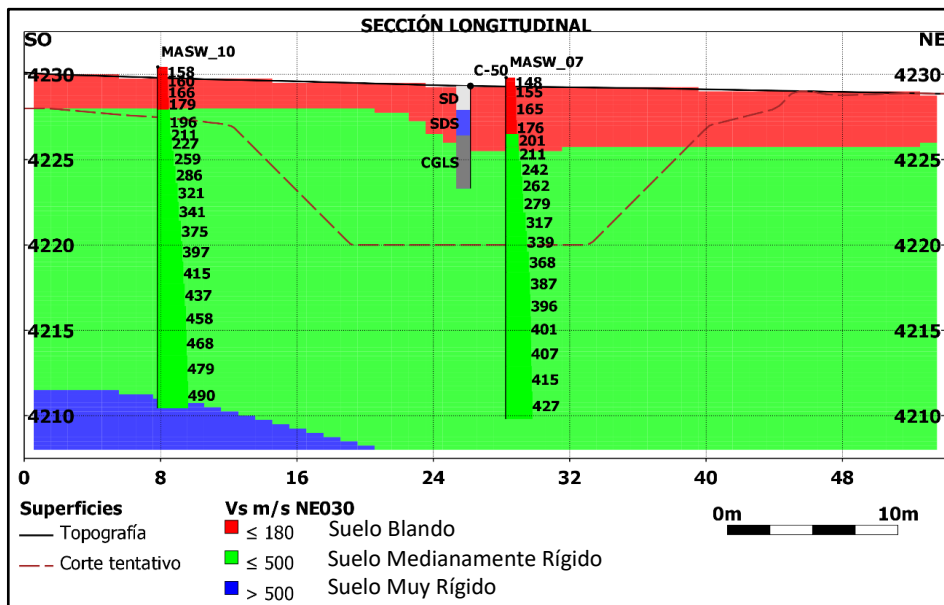


Figura 55

Modelo de bloques de las Vs. Nótese como la clasificación sismorresistente por Vs es congruente con los estratos de arenas aluviales y fluvioglaciares



En la tabla 21 se observa los datos de dispersión (desviación estándar y coeficiente de variación) de la interpolación de Vp y Vs por estrato.

Tabla 21

Variabilidad de la interpolación de Vp y Vs por estrato. En este cuadro se analiza el nivel de dispersión entre los datos del modelo de bloques

Estratos	Potencia (m)	Media Vp-m/s	DevStd Vp-m/s	Cv Vp	Media Vs-m/s	DevStd Vs-m/s	Cv Vs
SD	1 – 2,1	482,67	100,78	21%	160,10	4,55	3%
SDS	2 – 2,8	964,08	135,31	14%	180,44	10,20	6%
CGLS	17 - 18	1 636,28	57,08	3%	388,90	82,45	21%

Para las Vp hay mayor dispersión entre estratos de arenas aluviales, mientras que las Vs una mayor dispersión en el estrado de arena gravosa fluvioglacial. Esto nos indica que no se recomienda usar la media para las Vp y Vs por estrato si no considerar la variación por cota.

En la tabla 22 se muestran la dispersión por cota y se observa una clara reducción de la dispersión por lo tanto se tomó el valor de la media por cota como representativo. Con estas consideraciones se tratará también los resultados dependientes de las Vp y Vs, como es el caso de los parámetros elástico dinámicos, densidad relativa, ángulo de fricción y capacidad portante.

Tabla 22

Variabilidad de las Vp y Vs por estrato y cota de elevación. Un modelo de bloques nos permite discretizar los resultados a nivel de cota y estratos, y la población de datos nos permite determinar su confiabilidad desde el punto estadístico

Estrato	Cota	Media Vp- m/s	DevStd Vp-m/s	Cv-Vp	Media Vs-m/s	DevStd Vs-m/s	Cv-Vs
SD	4230	377,10	62,71	17%	159,54	3,96	2%
	4229	505,18	72,93	14%	160,39	4,95	3%
	4228	590,13	53,67	9%	159,72	4,14	3%
SDS	4228	828,71	84,26	10%	180,00	10,36	6%
	4227	1 007,81	83,39	8%	179,97	10,28	6%
	4226	1 127,94	55,64	5%	182,69	9,34	5%
	4227	1 439,49	50,41	4%	215,89	15,12	7%
	4226	1 471,61	42,05	3%	232,41	11,99	5%
	4225	1 518,92	50,59	3%	251,35	12,88	5%
	4224	1 570,90	42,55	3%	273,59	14,64	5%
CGLS	4223	1 604,78	36,44	2%	296,02	16,21	5%
	4222	1 623,66	28,03	2%	318,31	17,66	6%
	4221	1 635,87	20,85	1%	340,37	19,36	6%
	4220	1 644,88	16,22	1%	361,15	20,85	6%
	4219	1 652,33	13,61	1%	380,34	22,19	6%
	4218	1 658,57	10,81	1%	397,71	23,67	6%
	4217	1 664,05	7,48	0%	413,07	24,97	6%
	4216	1 668,07	3,80	0%	426,57	26,02	6%
	4215	1 669,85	0,75	0%	438,34	26,52	6%

Las secciones interpretadas y las interpolaciones de Vp y Vs se presentan en el Anexo 04 considerando los rangos aplicados anteriormente.

6.3. RESULTADOS DE PARÁMETROS ELÁSTICO DINÁMICOS, DENSIDAD RELATIVA Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EMPÍRICO

En la tabla 23 se muestran los resultados de estos parámetros por estrato, es perceptible la diferencia de las arenas aluviales y arenas gravosas fluvio-glaciares

en todos los parámetros indicando mayor competencia por el último estrato. No obstante, el análisis para la caracterización geotécnica debe realizarse por cota.

Tabla 23

Resumen de resultados de los parámetros para la caracterización geotécnica por estrato. Los parámetros elásticos muestran un contraste en el cambio de arenas aluviales y fluvio-glaciares

Estrato	Media Densidad g/cm³	Media Poisson (ν)	Media E-Mpa	Media G-Mpa	Media Dr-pct	Media Ángulo de fricción
SD	1,831	0,423	26,748	9,396	27,45	29,12
SDS	1,929	0,480	37,302	12,602	38,96	30,84
CGLS	2,066	0,469	191,594	65,419	92,23	42,11

En la tabla 24 podemos analizar los resultados por cota y estrato donde los parámetros calculados cambian de forma gradual con respecto a la cota.

Tabla 24

Resumen de resultados de los parámetros para la caracterización geotécnica por estrato y cota de elevación. El módulo de Poisson no presenta la misma tendencia de los demás parámetros debido a que la refracción sísmica y MASW no alcanzaron la misma profundidad

Estrato	Cota	Media Densidad g/cm³	Media Poisson (v)	Media E-Mpa	Media G-Mpa	Media Dr-pct	Media Ángulo de fricción
SD	4230	1,810	0,375	25,370	9,220	27,19	29,08
	4229	1,836	0,438	27,200	9,456	27,59	29,14
	4228	1,853	0,459	27,599	9,461	27,27	29,09
SDS	4228	1,902	0,474	36,413	12,358	38,60	30,79
	4227	1,938	0,483	37,351	12,595	38,66	30,80
	4226	1,963	0,486	39,054	13,138	40,55	31,08
CGLS	4227	2,026	0,488	56,528	18,991	52,51	37,54
	4226	2,033	0,487	65,486	22,020	58,26	38,20
	4225	2,043	0,486	76,898	25,879	64,98	38,97
	4224	2,053	0,484	91,511	30,830	70,34	39,59
	4223	2,060	0,482	107,360	36,218	77,71	40,44
	4222	2,064	0,480	124,163	41,955	86,58	41,46
	4221	2,066	0,477	141,894	48,035	93,93	42,30
	4220	2,068	0,475	159,591	54,129	98,27	42,80
	4219	2,070	0,472	176,803	60,079	99,89	42,99
	4218	2,071	0,469	193,114	65,738	100,00	43,00
	4217	2,072	0,467	208,115	70,960	100,00	43,00
4216	2,073	0,465	221,718	75,711	100,00	43,00	
4215	2,073	0,463	233,819	79,954	100,00	43,00	

Para un mejor entendimiento de la tabla 24 en la figura 56 se muestra la sección longitudinal del área de evaluación con los diferentes resultados mencionados.

Para la relación de Poisson (A) se observa una diferencia para la arena aluvial y su parte saturada siendo mayor esta última; para la arena gravosa la relación de Poisson es similar a la arena saturada.

La densidad empírica (B) es bien diferenciada para cada estrato, siendo la arena gravosa con mayor densidad por su granulometría y su grado de compactación.

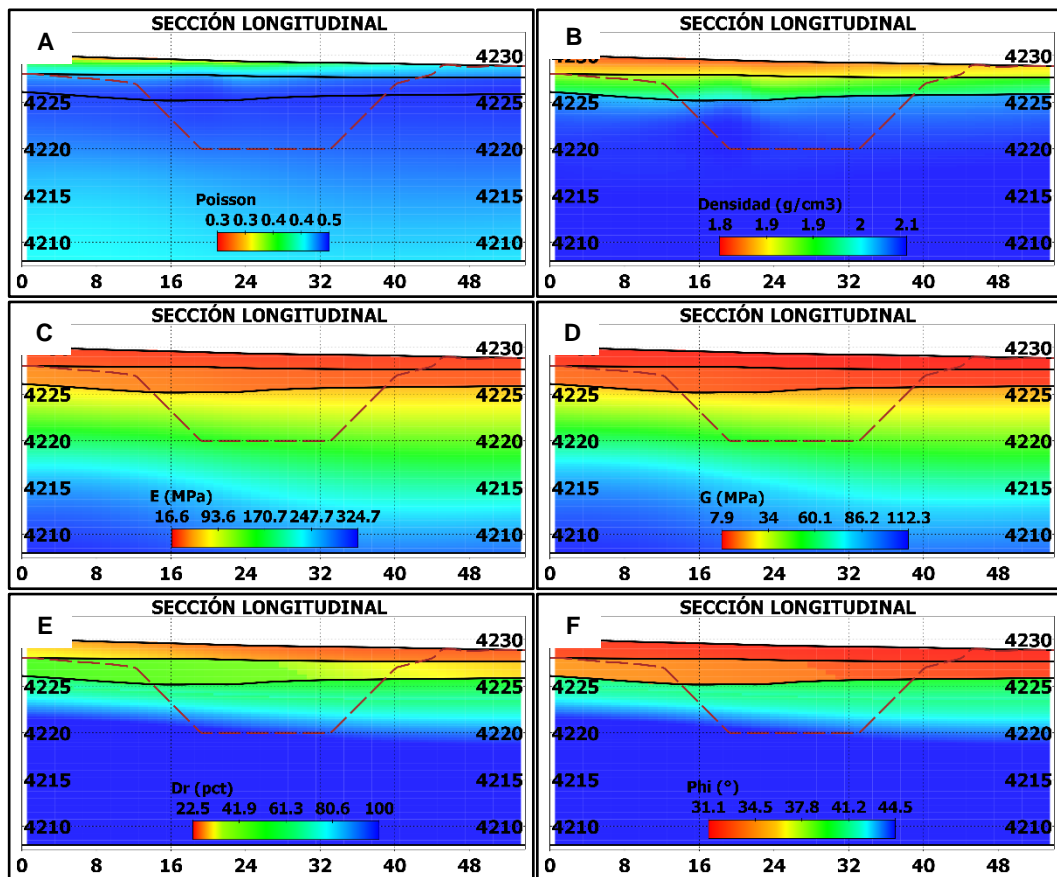
Los módulos de elasticidad (C) y corte (D) nos indican la razón de esfuerzo de compresión y cortante respectivamente para generar una deformación constante, los resultados nos muestran que a la arena gravosa se le debe aplicar mayores esfuerzos para generar deformaciones e indica a una mayor resistencia.

La densidad relativa (E) caracteriza a las arenas aluviales con una compacidad suelta y las arenas gravosas de denso a muy denso a partir de la cota 4222 según la tabla 5; de la misma manera el ángulo de fricción (F) tiene el mismo comportamiento mostrando los valores más altos a partir de la cota 4222.

Estos resultados indican mejores características geotécnicas del último estrato de arenas gravosas, pero cabe recalcar que se encuentra saturado por el nivel freático lo que nos llevará aplicar factores de corrección en el cálculo de la carga admisible.

Figura 56

Secciones longitudinales del área de evaluación con los resultados de los parámetros considerados. A) Densidad. B) Coeficiente de Poisson. C) Módulo de Elasticidad. D) Módulo de Corte. E) Densidad Relativa. F) Ángulo de Fricción. Secciones procesadas en software de modelamiento 3D. Los parámetros elástico dinámicos se analizan como valores continuos y contrastan las propiedades para la arena aluvial y fluvio-glaciar



Cabe recalcar que también con la densidad relativa se determinó el comportamiento de licuefacción en las arenas gravosas, basándonos en Ovando y Segovia (1996) que indica que una arena es licuable cuando la densidad relativa es mayor a 65%. En la tabla 24 podemos observar que la D_r en la cota 4220 supera el 90% indicando que no habría licuefacción. Se indica esta cota ya que es el límite del corte propuesto para el emplazamiento de la planta de bombeo.

6.4. ESTIMACIÓN DE CARGAS TRANSMITIDAS POR LA PLANTA DE BOMBEO

La carga transmitida se estimó considerando el peso de las estructuras y la carga sísmica, este último fue calculado de forma empírica y las con consideraciones mínimas indicadas en la Norma Técnica E.030 de diseño sismorresistente. El peso de las estructuras o elementos como zapatas, vigas, muros, columnas, pisos, etc. se calcularon de forma convencional con su volumen y la densidad del concreto.

En la tabla 25 se muestran las cargas transmitidas al suelo por la planta de bombeo junto a la cimentación de máquinas, como era de esperarse en el caso de una losa de cimentación la carga es mucho menor que en el caso de zapatas individuales.

Tabla 25

Resultados de las cargas transmitidas por las cimentaciones. Se estimó la carga considerando el peso de todas las estructuras de la planta de bombeo

Cimentación	Cota de Acción de la Carga	B (m)	L (m)	Carga Transmitida (kg/cm²)	Carga Transmitida + Sismo (kg/cm²)
Zapata Individual	4219,0	1,5	2,0	2,433	2,968
Bloque Rígido	4219,5	4,1	5,3	1,074	1,300
Losa de Cimentación	4220,0	12,0	15,5	0,530	0,637

6.5. RESULTADOS DE LA CAPACIDAD PORTANTE

Para los resultados de carga admisible por la metodología de Tezcan se considera lo definido por Lambe y Whitman para suelos saturados, se aplica el

70%. En la tabla 26 se muestra los resultados para las zapatas individuales. Según los resultados para la cota 4219 la carga admisible es de 1,313 kg/cm² concluyendo que este tipo de cimentación no es viable.

Tabla 26

Carga admisible calculada para zapatas individuales de 1,5x1,5 m . Los resultados de carga admisible también se pueden analizar según la dispersión por cota. El bajo Cv indica valores no dispersos siendo la media un valor a considerar

Estrato	Cota	Min Qadm (Kg/cm2)	Max Qadm (Kg/cm2)	Media Qadm (Kg/cm2)	DevStd	Cv
	4220,0	1,140	1,390	1,244	0,069	5,6%
	4219,5	1,170	1,420	1,279	0,071	5,6%
CGLS	4219,0	1,198	1,457	1,313	0,074	5,6%
	4218,5	1,226	1,495	1,346	0,076	5,7%
	4218,0	1,253	1,558	1,376	0,079	5,7%

En la tabla 27 se tiene los resultados para la cimentación tipo bloque. Los resultados indican que a una cota de 4 219,5 la carga admisible de 1,046 kg/cm² siendo menor que la carga transmitida, lo cual nos indica que tampoco es viable aplicar esta distribución de cimentaciones, porque para mejorar los resultados deberíamos aumentar el área de las cimentaciones por lo tanto resulta más viable aplicar una losa de cimentación.

Tabla 27

Carga admisible calculada para la cimentación tipo bloque 4,1x5,3 m . El bajo Cv indica valores no dispersos siendo la media un valor a considerar

Estrato	Cota	Min Qadm (kg/cm²)	Max Qadm (kg/cm²)	Media Qadm (kg/cm²)	DevStd	Cv
	4220,5	0,907	1,126	0,987	0,054	5,5%
	4220,0	0,932	1,137	1,017	0,057	5,6%
CGLS	4219,5	0,956	1,161	1,046	0,058	5,6%
	4219,0	0,980	1,191	1,074	0,060	5,6%
	4218,5	1,002	1,222	1,100	0,062	5,7%

En la tabla 28 se tiene los resultados para la losa de cimentación. Los resultados indican que a una cota de 4220 la carga admisible es de 0,916 kg/cm² lo cual nos indica que el suelo tiene la capacidad de soportar las cargas transmitidas incluyendo las cargas sísmicas por la losa de cimentación y esto lo define como el tipo de cimentación a aplicar.

Tabla 28

Carga admisible calculada para la losa de cimentación. El bajo Cv indica valores no dispersos siendo la media un valor a considerar

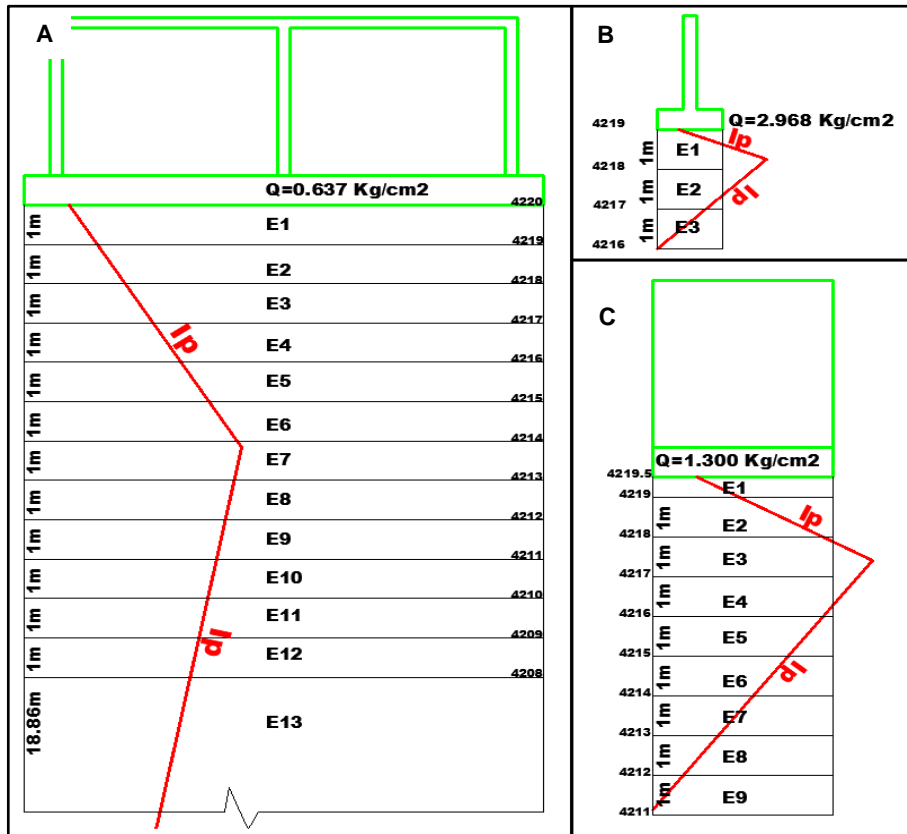
Estrato	Cota	Min Qadm (kg/cm²)	Max Qadm (kg/cm²)	Media Qadm (kg/cm²)	DevStd	Cv
CGLS	4220,5	0,817	1,014	0,889	0,049	5,5%
	4220,0	0,839	1,024	0,916	0,051	5,6%
	4219,5	0,862	1,047	0,942	0,052	5,6%
	4219,0	0,883	1,074	0,968	0,054	5,6%

6.6. ASENTAMIENTOS ESTIMADOS

Para el cálculo de asentamientos se aplicó un factor de corrección por empotramiento C1 igual a 1, para el factor de corrección por flujo de plasticidad C2 se considera un tiempo de 25 años por el tiempo de servicio. El suelo de cimentación son las arenas gravosas y para considerar el aumento gradual del módulo de elasticidad se discretiza la profundidad de análisis por factor de influencia por metro como se muestra en la figura 57 donde se observa el esquema de cimentación, la carga transmitida y las líneas de factor de influencia.

Figura 57

Tipos de cimentación con factor de influencia semiempírico. A) Losa de cimentación. B) Zapata. C) Bloque rígido. Nótese que para la losa de cimentación la última capa de discretización es mayor por la falta de datos ya que es el límite de información registrada por la prospección sísmica



En la tabla 29, se muestran los asentamientos calculados, la profundidad de influencia D_z , la media ponderada del módulo de elasticidad y la constante por factor de influencia total para cada tipo de cimentación.

Con estos resultados podemos ver que el asentamiento está directamente relacionado con la profundidad de influencia, siendo el mayor asentamiento de 3,5 mm por parte de la losa de cimentación y considerándose admisible.

El asentamiento producido por las zapatas y el bloque rígido también son admisibles, pero son descartadas por la capacidad portante del suelo.

Tabla 29

Asentamientos calculados para cada tipo de cimentación. Se observa mayor asentamiento por la losa de cimentación debido a que presenta mayor influencia en profundidad

	Carga Transmitida (kg/cm²)	B (m)	Dz (m)	Media E (kg/cm²)	Iz*Dz/E	Se (mm)
Zapata	2,968	1,5	3,0	1594,84	0,052	2,3
Bloque	1,300	4,1	8,37	1810,63	0,129	2,5
Losa de Cimentación	0,637	12,0	30,86	2260,62	0,372	3,5

CONCLUSIONES

- Las unidades litoestratigráficas identificadas en el área de estudio están comprendidas de techo a base por depósitos aluviales, depósitos piroclásticos de toba dacítica producto de eventos volcánicos recientes y depósitos fluvioglaciares que presentan un grado alto de compactación.
- En el área de evaluación la parte no saturada de las arenas aluviales tienen una potencia variable de 1 a 2,1 m, mientras la saturada 2 a 2,8 m y las arenas gravosas una potencia de 17 a 18 m teniendo continuidad en profundidad.
- Las velocidades V_p aumentan gradualmente en profundidad, esto tiene congruencia con el aumento de densidad por compactación y por saturación. Para el área de evaluación las arenas aluviales tienen una V_p promedio de 483 m/s. Las arenas aluviales saturadas tienen una V_p promedio de 964 m/s. Las arenas gravosas tienen una V_p promedio de 1 636 m/s.
- Las velocidades V_s también aumentan en profundidad teniendo mayor contraste en el paso de los depósitos aluviales a fluvioglaciares. En este último las V_s indican un aumento gradual de la compactación del estrato. Los depósitos aluviales tienen una V_s promedio de 160 m/s. La parte saturada de este depósito un promedio de 180 m/s. Los depósitos fluvioglaciares tienen una V_s promedio de 389 m/s. Las velocidades mayores a 500 m/s corresponden a estratos muy rígidos y pueden

corresponder a capas más compactas del último estrato o con mayor granulometría tendiendo a gravas.

- Los parámetros elástico dinámicos, la densidad relativa y ángulo de fricción empírica reflejan el comportamiento de las V_p y V_s , tal como se ha descrito el con la densidad.
- La densidad empírica calculada para los depósitos aluviales tiene un valor mínimo de 1,777 y máximo de 1,786 gr/cm^3 . Para su parte saturada un valor mínimo de 1,845 y máximo de 2,0 gr/cm^3 . Los depósitos fluvioglaciares presentan un valor mínimo de 2,008 de máximo de 2,073 gr/cm^3 .
- La relación de Poisson calculada para los depósitos aluviales tiene un valor mínimo de 0,322 y máximo de 0,473. Para su parte saturada un valor mínimo de 0,426 y máximo de 0,490. Los depósitos fluvioglaciares presentan un valor mínimo de 0,446 y máximo de 0,491.
- El módulo de elasticidad calculado para los depósitos aluviales tiene un valor mínimo de 16,577 y máximo de 34,696 MPa Para su parte saturada un valor mínimo de 30,191 y máximo de 48,289 MPa Los depósitos fluvioglaciares presentan un valor mínimo de 75,244 y máximo de 291,445 MPa .
- El módulo de corte calculado para los depósitos aluviales tiene un valor mínimo de 7,901 y máximo de 11,857 MPa . Para su parte saturada un valor mínimo de 10,177 y máximo de 16,234 MPa . Los depósitos

fluvioglaciares presentan un valor mínimo de 25,320 y máximo de 100,351 MPa .

- La densidad relativa calculada para los depósitos aluviales tiene un valor mínimo de 22,50 y máximo de 41,50 %. Para su parte saturada un valor mínimo de 28,630 y máximo de 47,857 %. Los depósitos fluvioglaciares presentan un valor mínimo de 52,508 y máximo de 100,0 %.
- El ángulo de fricción empírico calculado para los depósitos aluviales tiene un valor mínimo de 28,38° y máximo de 31,23°. Para su parte saturada un valor mínimo de 29,29° y máximo de 32,18°. Los depósitos fluvioglaciares presentan un valor mínimo de 36,85° y máximo de 43,0°.
- Los resultados de campo y laboratorio corresponden a muestras del estrato de depósitos aluviales, y se compararon con los resultados de las correlaciones empíricas. La densidad empírica obtenida (1,750 gr/cm³) es ligeramente más conservadora que la densidad in situ (1,799 gr/cm³). La densidad relativa empírica (33,11%) se obtuvo de la correlación de Otha y Goto (1978) por ser la más cercana y conservadora al resultado de laboratorio (38,8%).
- El ángulo de fricción de los depósitos aluviales se obtuvo mediante la correlación de Meyerhof (1956) para arenas con 5% de finos, para los depósitos fluvioglaciares de arenas gravosas se aplicó la correlación de Burmister (1948) por considerar la granulometría del suelo. Los resultados obtenidos tienen congruencia con valores típicos mencionados por otros autores.

- La carga transmitida por las estructuras considerando la carga sísmica para zapatas es de $2,968 \text{ kg/cm}^2$, para el bloque rígido es de $1,300 \text{ kg/cm}^2$ y la losa de cimentación es de $0,637 \text{ kg/cm}^2$.
- Se considera el 70% de las capacidades portantes calculadas por presencia de nivel freático. La capacidad portante se calculó con la metodología de Tezcan y los asentamientos por Schmertmann y Hartman (1978) quienes consideran un factor de influencia semiempírico. Para zapatas la capacidad portante es de $1,313 \text{ kg/cm}^2$ y asentamiento de 2,3 mm. Para un bloque rígido es de $1,046 \text{ kg/cm}^2$ y asentamiento de 2,49 mm. Para una losa de cimentación es de $0,916 \text{ kg/cm}^2$ y asentamiento de 3,5 mm. Por lo tanto, se concluye que la losa de cimentación es la cimentación a aplicar.
- La losa de cimentación interactúa con los depósitos fluvioglaciares a una cota de 4220, desde esta cota la densidad relativa es mayor al 90%, y basándonos en Ovando y Segovia (1996) este estrato no es licuable.
- Las características geotécnicas de los depósitos aluviales no son favorables para emplazar obras civiles porque están dentro de la clasificación de suelos blandos de compacidad suelta y baja capacidad portante. El estrato de arena gravosa de origen fluvioglacial desde la cota 4223 presenta mejores características geotécnicas por tener mayor compactación (densidad relativa), siendo el nivel freático el único factor desfavorable. Pero cabe recalcar que solo admite el emplazamiento de una losa de cimentación.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar ensayos geofísicos con una mejor distribución de las líneas sísmicas, utilizando 48 geófonos y una mayor fuente de energía para alcanzar profundidades mayores para la refracción sísmica y MASW.
- Se recomienda realizar ensayos de prospección eléctrica para contrastar los resultados de prospección sísmica.
- Se recomienda realizar ensayos invasivos para verificar la existencia de suelos muy rígidos detectados a mayor profundidad por los ensayos MASW.
- Se recomienda hacer mediciones de la variación del nivel freático para plantear alternativas para su descenso de forma artificial en la etapa de ejecución del proyecto.
- Para estructuras de mayor envergadura que la planta de bombeo propuesta se recomienda un mejoramiento o sustitución de suelos con el control del nivel freático.
- Se recomienda hacer un estudio de dinámica de suelos para comprender el comportamiento del suelo frente a las vibraciones de las máquinas de bombeo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, A. (2007). *Correlación entre el valor N del ensayo de penetración estándar y velocidad de ondas de corte para arcillas en Bogotá-Colombia*. Revista Épsilon, 8, 13-23.
- Alva, J. (2013). *Aplicación de la geofísica en la ingeniería geotécnica*. Universidad Nacional del Centro del Perú. IX COINEIC, Huancayo, Perú.
- Braja, D. (2001). *Principio de Ingeniería de Cimentaciones*. México, México. International Thomson Editores.
- Cahuana, R. (2009). *Refracción sísmica y Remi aplicados a la obtención de parámetros dinámicos del suelo en un estudio geológico-geotécnico en "La Florida" Distrito Alto de la Alianza – Tacna* (tesis de pre-grado para ingeniería). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú.
- Canqui, T. (2013). *Sísmica de refracción y microtremores para caracterización de parámetros dinámicos superficiales en un estudio geotécnico en la quebrada Caramolle, Distrito de Pocollay – Tacna* (tesis de pre-grado para ingeniería). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú.
- Devincenzi, M. y Frank, N. (2004). *Ensayos geotécnicos in situ su ejecución e interpretación*. IGEO TEST, Girona, España.
- Díaz, S. (2007). *Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie*. Trabajo de ingreso a la academia de Ingeniería de México.

- Flores, J. (2012). *Análisis dinámico de cimentaciones Parque Industrial – Ica* (tesis de pre-grado para ingeniería). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Gonzáles, G. et.al. (2014). *Determinación del parámetro de resistencia, ángulo de fricción Interna y su relación con los parámetros densidad relativa (D_r) y relación de vacíos (e) en suelos granulares*. Universidad de los Andes. *Revista de Ciencia e Ingeniería*, 35, 135-146.
- Jaimes, J. (2011). *Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: Estado del arte* (tesis de pre-grado para ingeniería). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Lambe, W., & Whitman, R. (1981). *Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa.
- Manilla, A., Garnica, P. y Pérez, A. (2003). *Evaluación Indirecta de los Módulos Elásticos de Rigidez In Situ y la Relación entre V_p/V_s y el Ángulo d Fricción Interna*. Instituto Mexicano del Transporte, 225, 14-17.
- Mendívil, S. (1965). *Geología de los cuadrángulos de Maure y Antajave (Hojas 35-x, 35-y) - [Boletín A 10]*. INGEMMET, Lima, Perú.
- Park, C. (2014). *Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)*. Park Seismic LLC Recuperado de <http://www.masw.com/>.
- Peralta, A. (2007). *Levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en el área de El Mamón, al norte del poblado de Urumaco, Estado Falcón* (tesis de pre-grado para ingeniería). Universidad Simón Bolívar, Sartajenas, Venezuela.

- Pérez, I. (2015). *Caracterización geotécnica de los suelos de Madrid mediante la técnica REMI* (tesis doctoral para ingeniería). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.
- Portal, T. (2017). *Estudio geofísico por el método de refracción sísmica y MASW para el mejoramiento y ampliación de cinco puentes en la región de Junin* (tesis de pre-grado para ingeniería). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Quispe, M. (2012). *Exploración geofísica mediante métodos de refracción sísmica y MASW 1D en proyectos de ingeniería civil* (tesis de pre-grado para ingeniería). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Rocha, M. (2016). *Interpolación Espacial en 3 Dominios 3D de Datos Sísmicos de Reflexión en el Bloque Llanos 26, Cuenca de Llanos Orientales, Colombia* (tesis de maestría para ingeniería). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Rojas, S. (2008). *Sísmica de refracción y de microtremores para caracterización de parámetros dinámicos superficiales en Caracas* (tesis de pre-grado para ingeniería). Universidad Simón Bolívar, Sartajenas, Venezuela.
- Tezcan, S., Keceli, A. y Ozdemir Z. (2006). *Allowable bearing capacity of shallow foundations based on shear wave velocity*. Geotechnical and Geological Engineering, 24, 208-210.
- Tezcan, S., Keceli, A., Ozdemir Z. y Erkal, A. (2007). *A rapid technique to determinate allowable bearing pressure*. International Earth Symposium Kocaeli 2007, 235-238.

- Vargas, C. (2015). *Análisis de licuación de arenas mediante el empleo de métodos de campo, análisis de respuesta de sitio y modelos numéricos de generación de presión de poro* (tesis de maestría para ingeniería). Universidad Nacional Autónoma de México, México, México.
- Villilli, N. (2018). *Caracterización geotécnica de los suelos volcánico Sencca, mediante refracción sísmica y análisis de ondas superficiales (MASW), en el A.A.H.H. Villa Florida del distrito de Yura-Arequipa* (tesis de pre-grado para ingeniería). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.

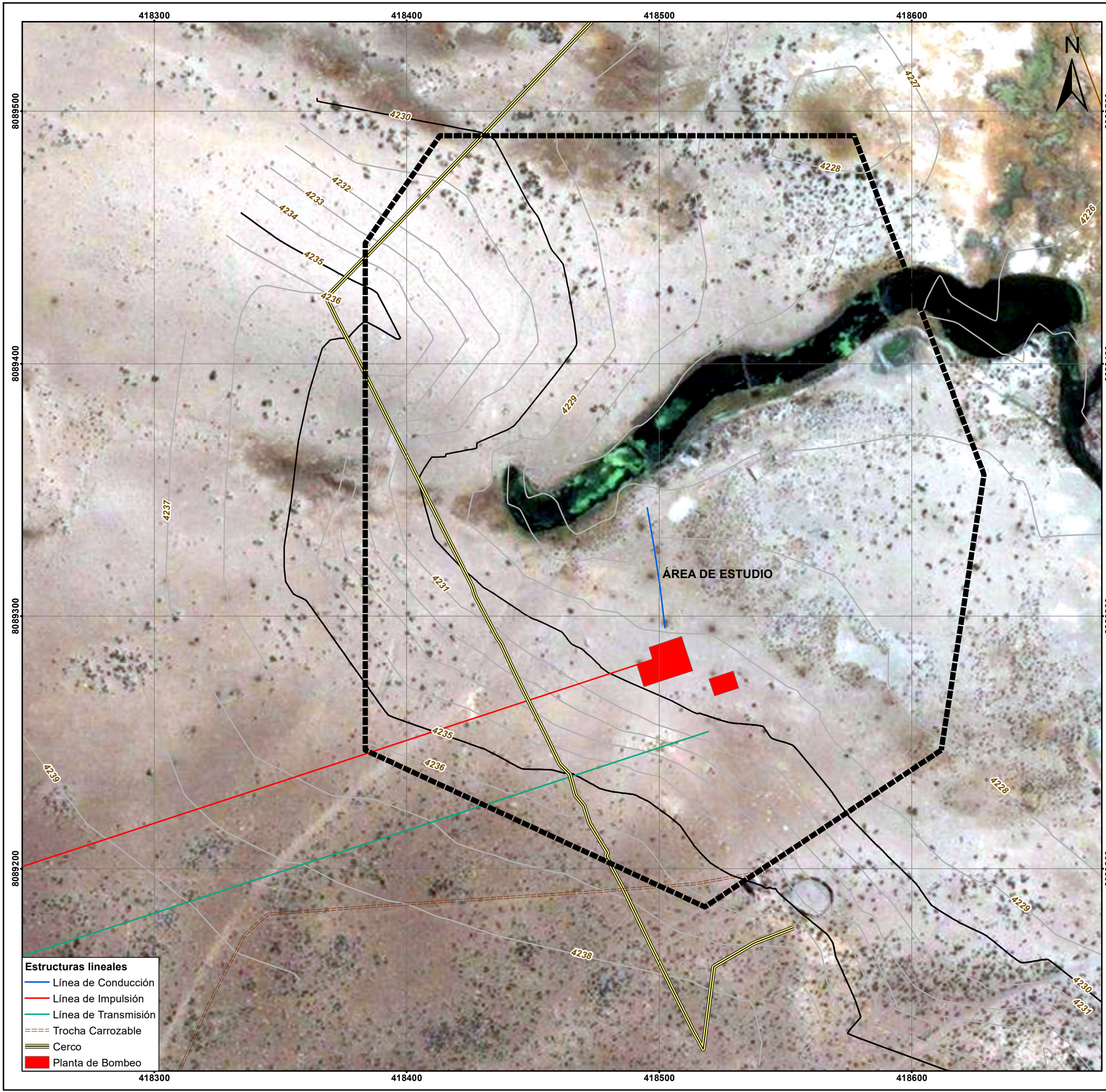
ANEXO 1

PLANOS

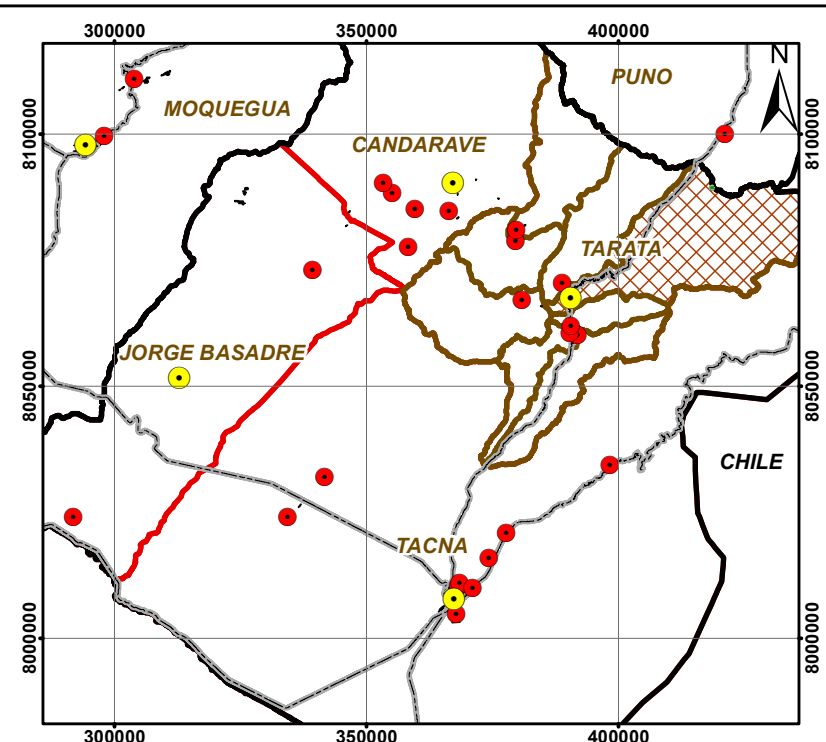
ANEXO 01-A: PLANO DE UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

ANEXO 01-B: PLANO GEOLÓGICO LOCAL

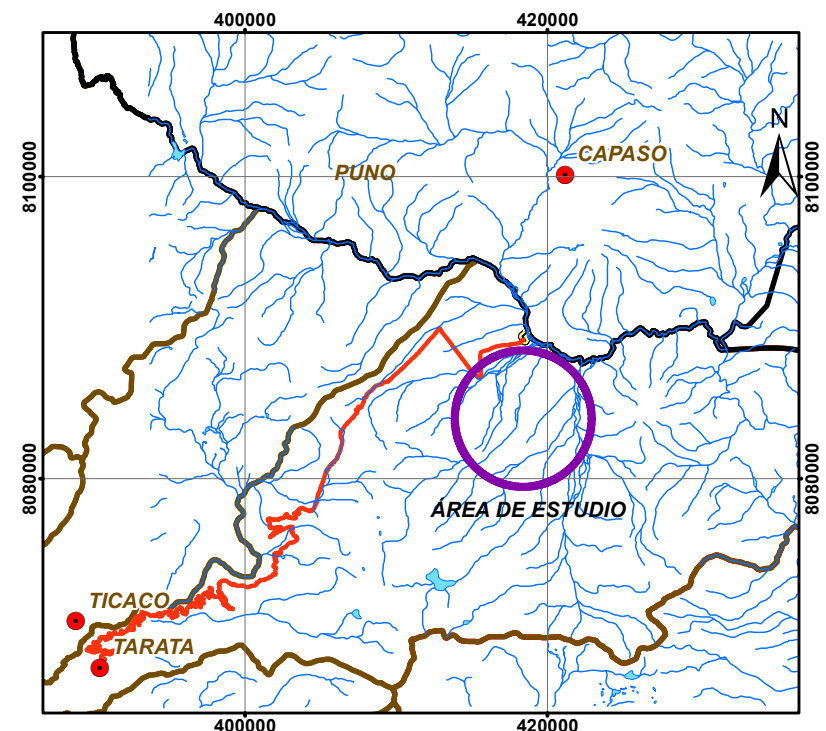
ANEXO 01-C: DISTRIBUCIÓN DE LOS ENSAYOS GEOFÍSICOS Y CALICATAS
EN EL ÁREA DE ESTUDIO



- Estructuras lineales**
- Línea de Conducción
 - Línea de Impulsión
 - Línea de Transmisión
 - Trocha Carrozable
 - Cerco
 - Planta de Bombeo



LÍMITE PROVINCIAL
ESC: 1/1,500,000



LÍMITE DISTRITAL
ESC: 1/500,000

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

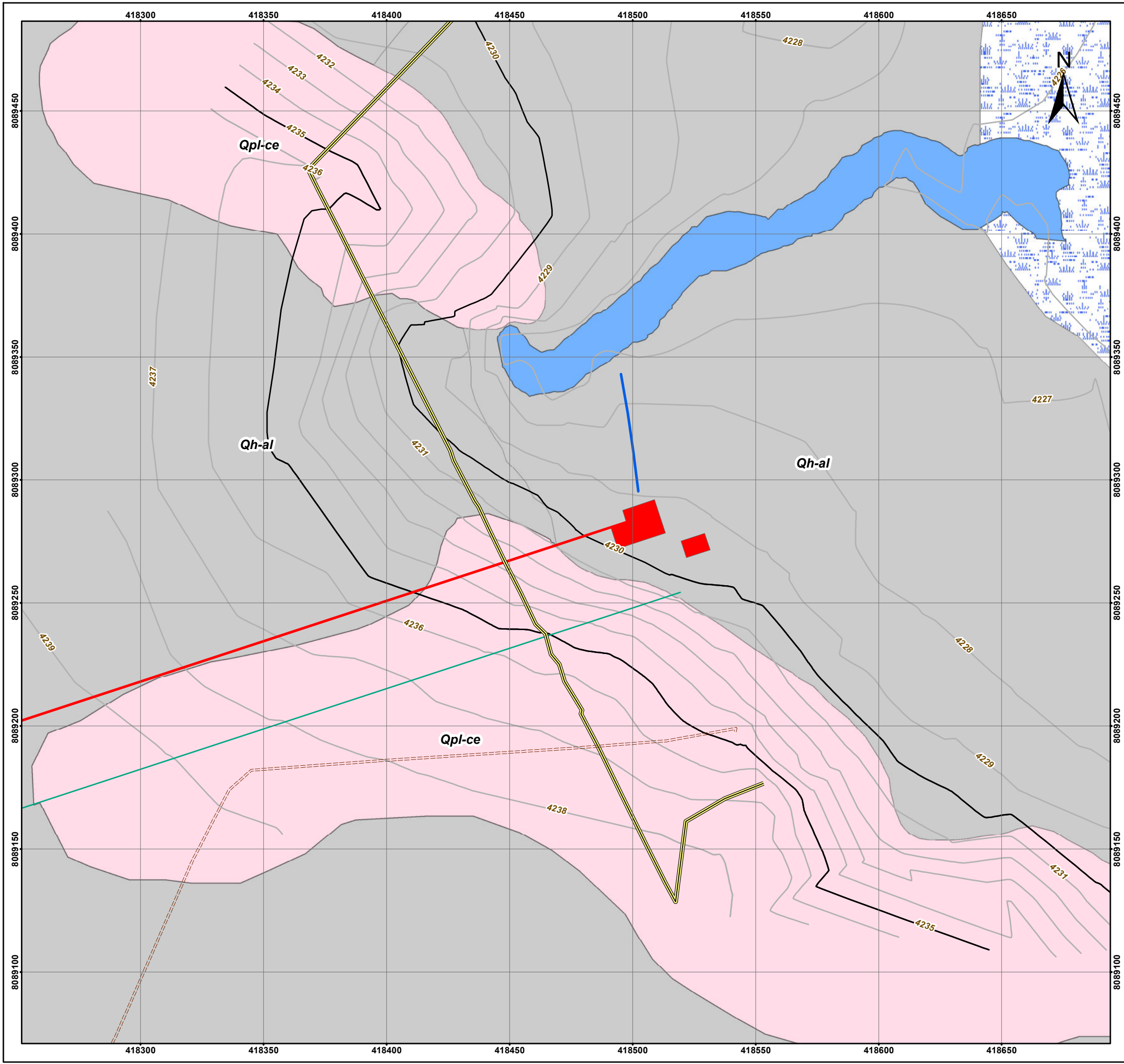
FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

PLANO DE UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:1,500	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 01-A
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	



- Leyenda**
- Trocha Carrozable
 - Cerco
- Estructuras lineales**
- Línea de Conducción
 - Línea de Impulsión
 - Línea de Transmisión
 - Planta de Bombeo
- Litología**
- Bofedal
 - Dep. Aluviales (Qh-al)
 - Toba Dacítica (Qpl-ce)

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

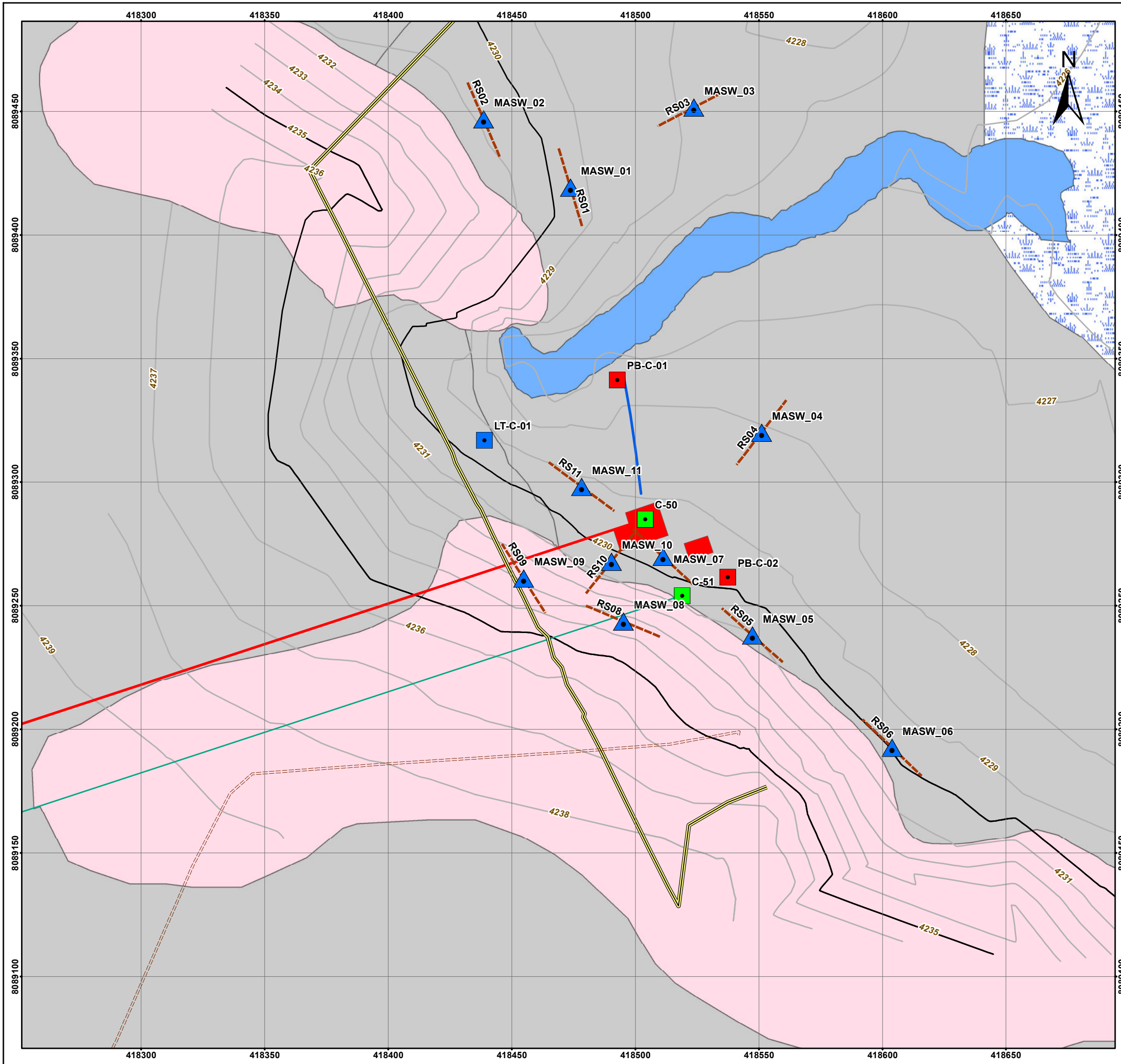
FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

PLANO GEOLÓGICO LOCAL

DATUM:	ESCALA:	FECHA:	PLANO N°:
WGS84_ZONA 19S	1:1,500	Ago. 2021	ANEXO 01-B
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	



Legenda

- Trocha Carrozable
- == Cerco
- Calicatas PB 2000
- Calicatas LT 2009
- Calicatas Ejecutadas
- Ensayos MASW**
- ▲ Punto MASW
- Línea de Refracción Sísmica
- Estructuras lineales**
- Línea de Conducción
- Línea de Impulsión
- Línea de Transmisión
- Planta de Bombeo
- Litología**
- Bofedal
- Dep. Aluviales
- Toba Dacítica

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

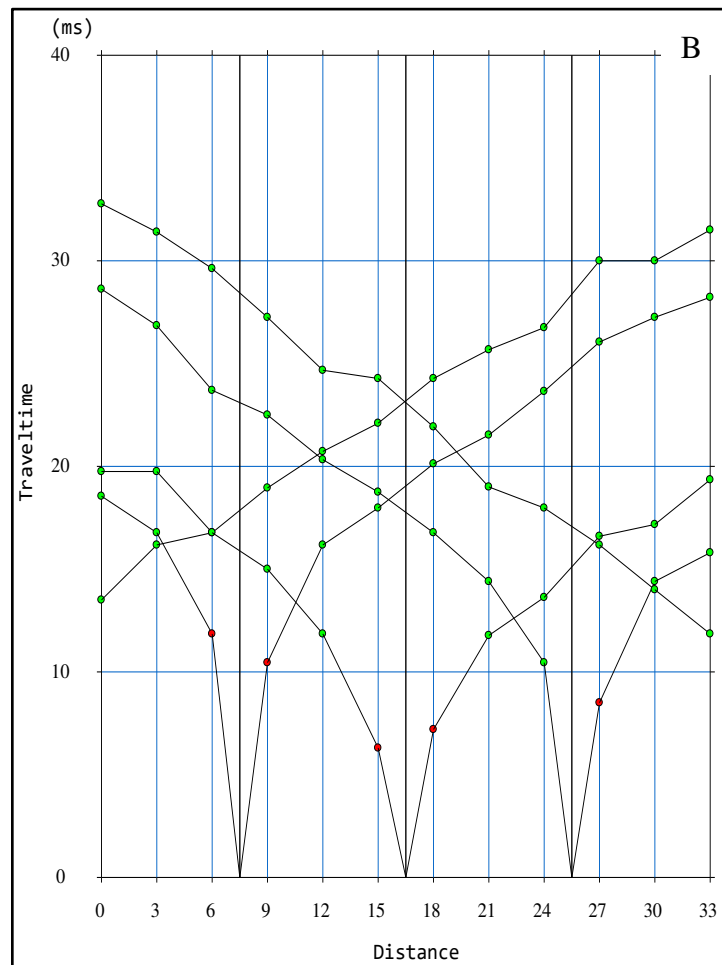
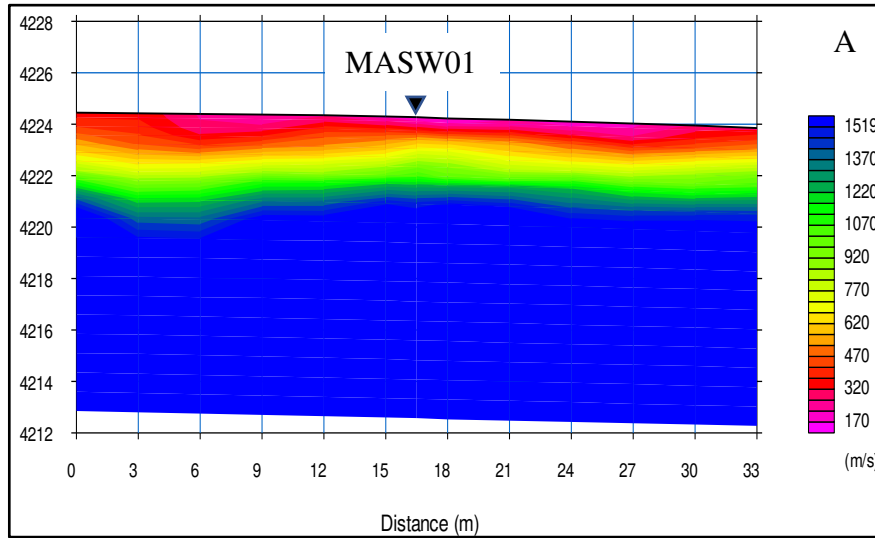
DISTRIBUCIÓN DE ENSAYOS GEOFÍSICOS Y CALICATAS

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:1,500	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 01-C
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	

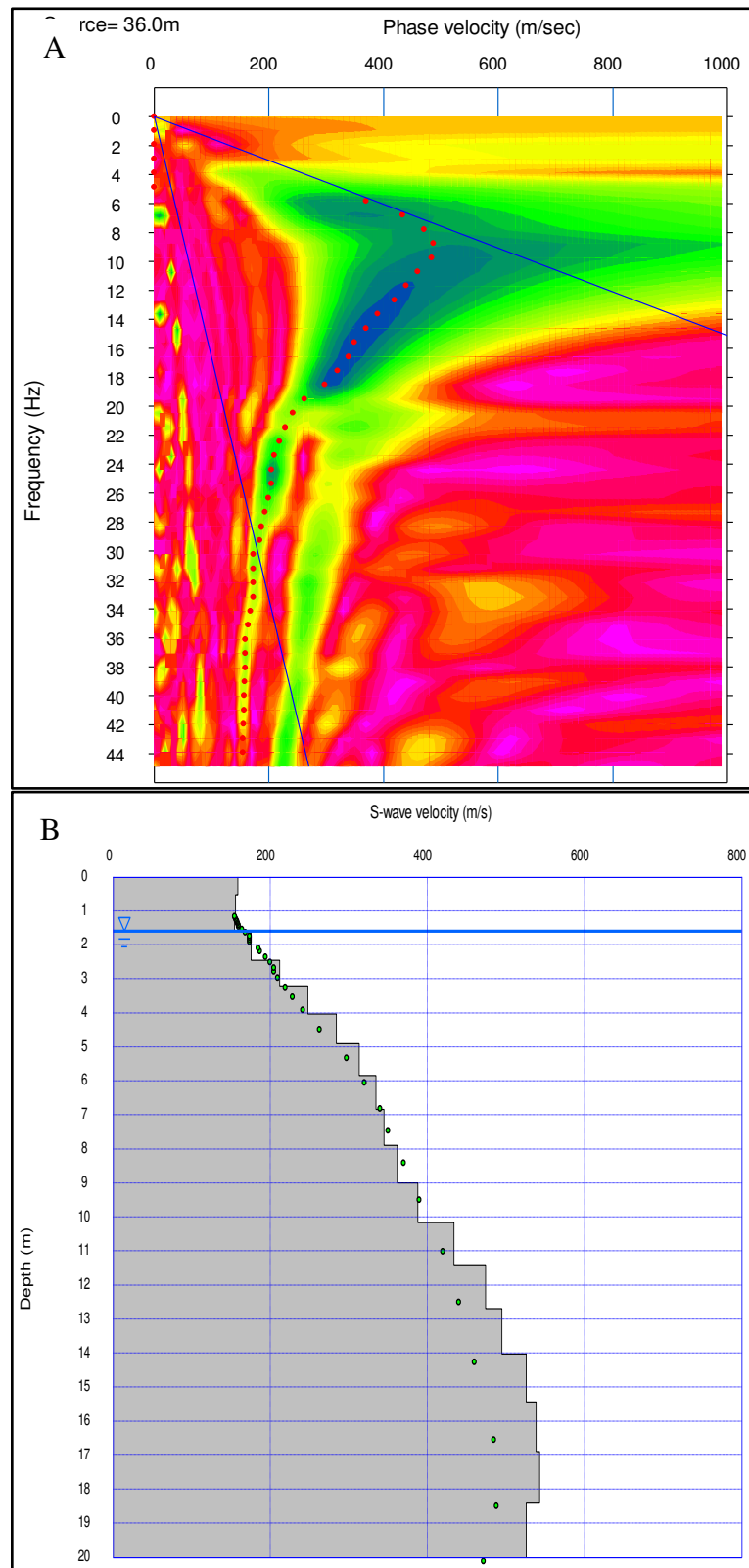
ANEXO 2

PROSPECCIÓN SÍSMICA

1. Resultados gráficos de la línea sísmica RS01 y ensayo MASW01

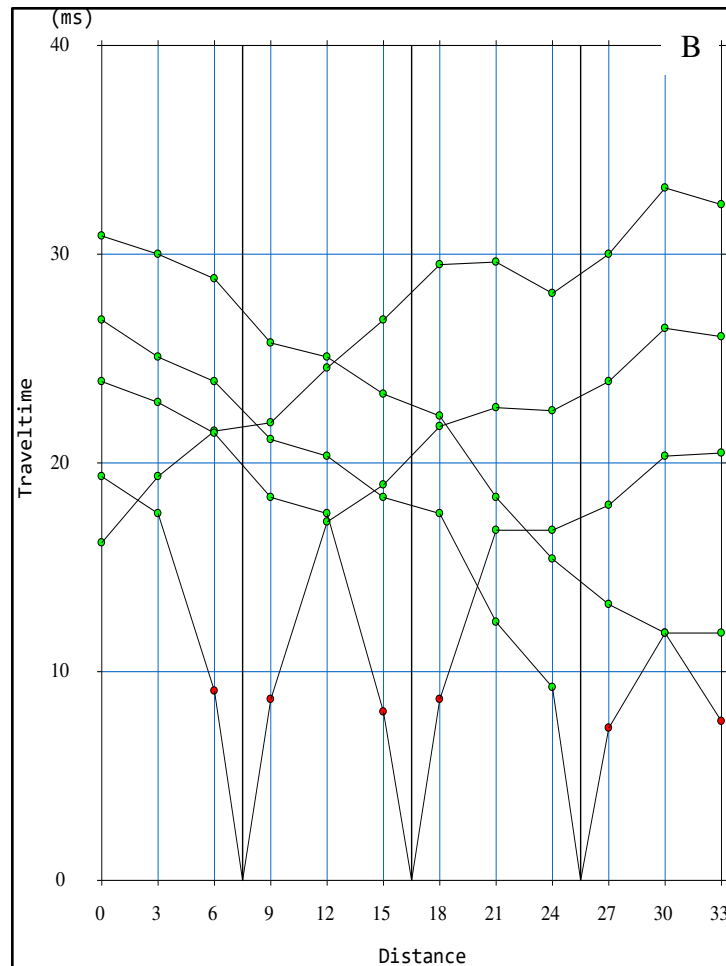
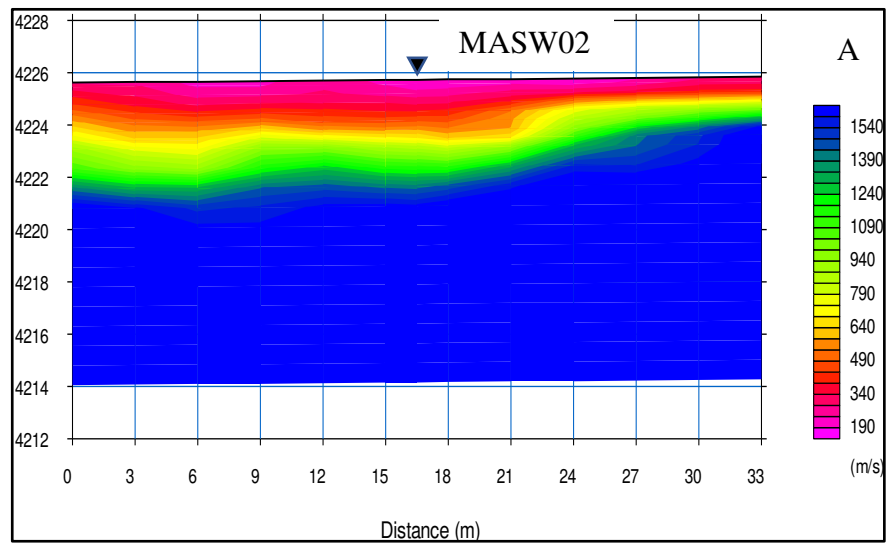


A) Tomografía sísmica de la línea RS01. B) Domocronas de la línea RS01.

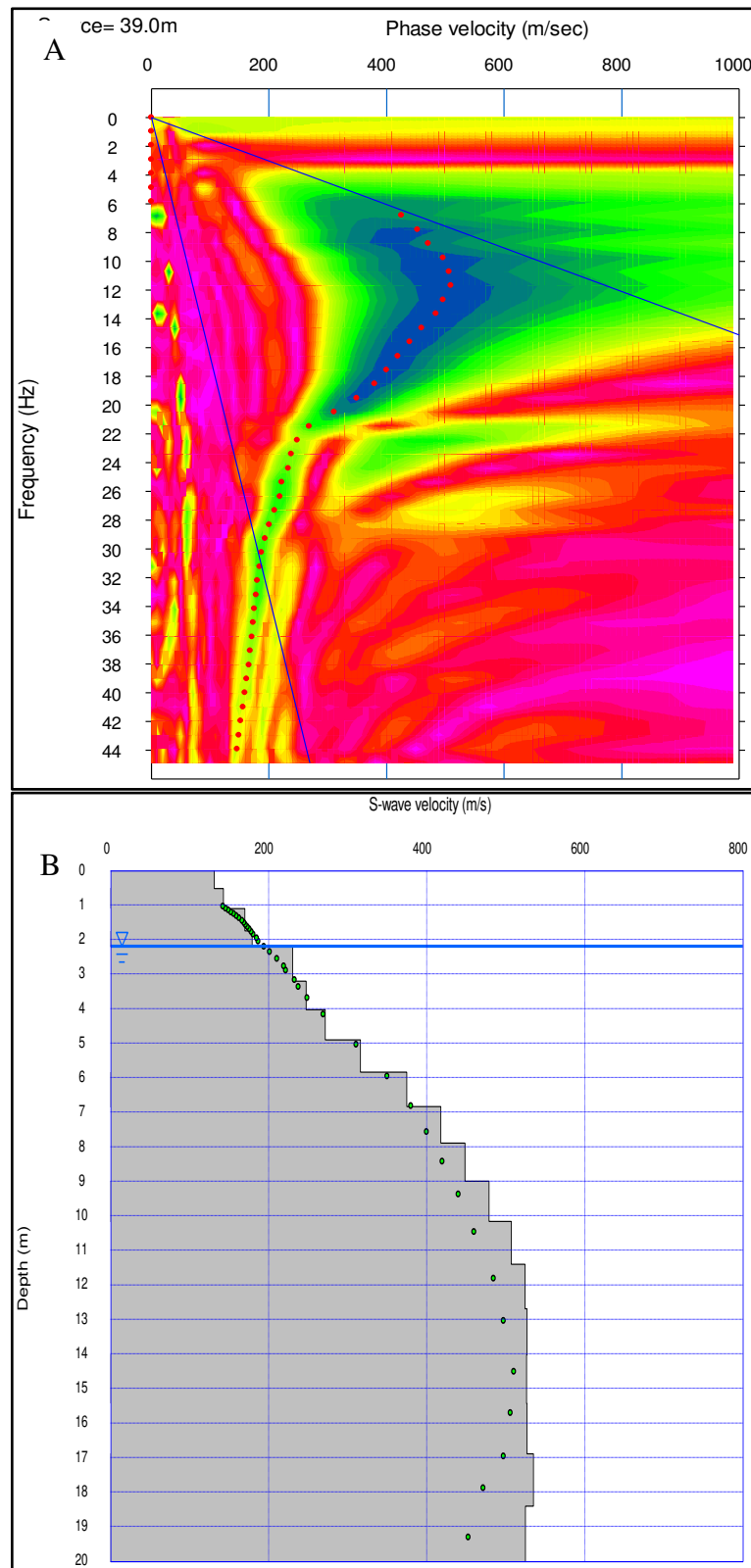


A) Imagen de Dispersión del ensayo MASW01. B) Perfil Vs 1D del ensayo MASW01.

2. Resultados gráficos de la línea sísmica RS02 y ensayo MASW02

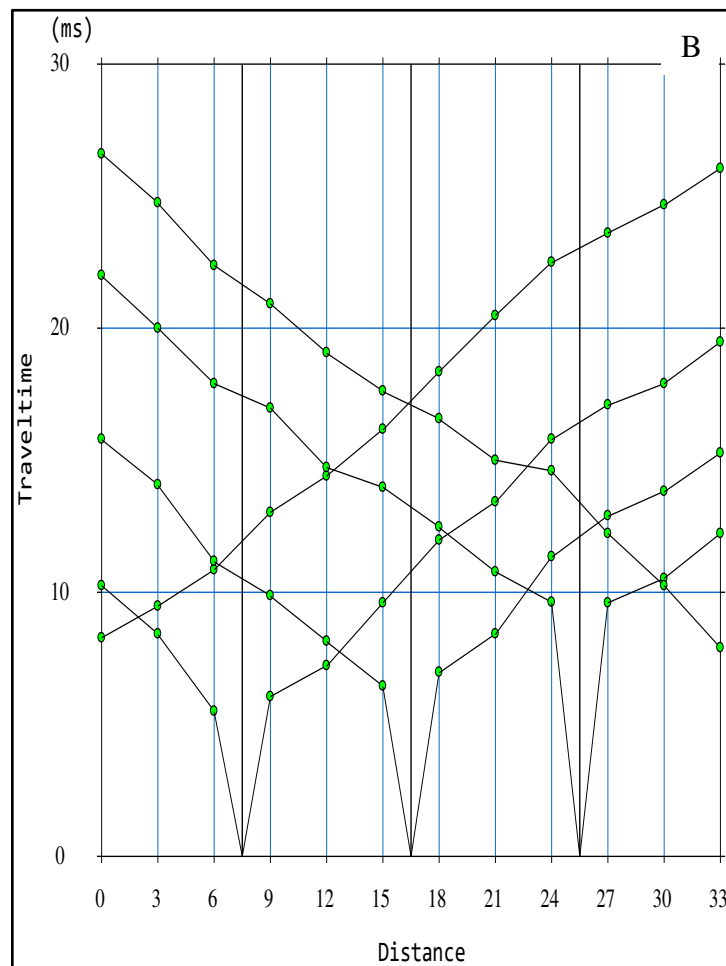
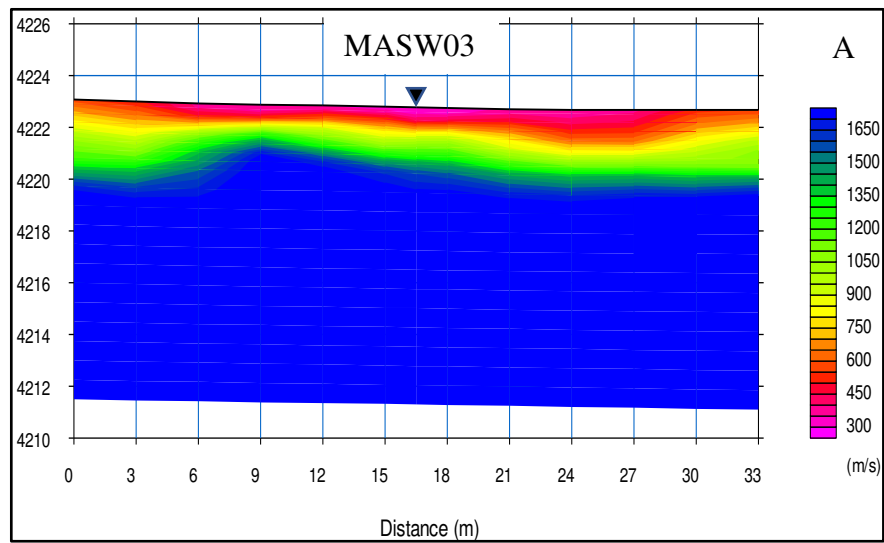


A) Tomografía sísmica de la línea RS02. B) Domocronas de la línea RS02.

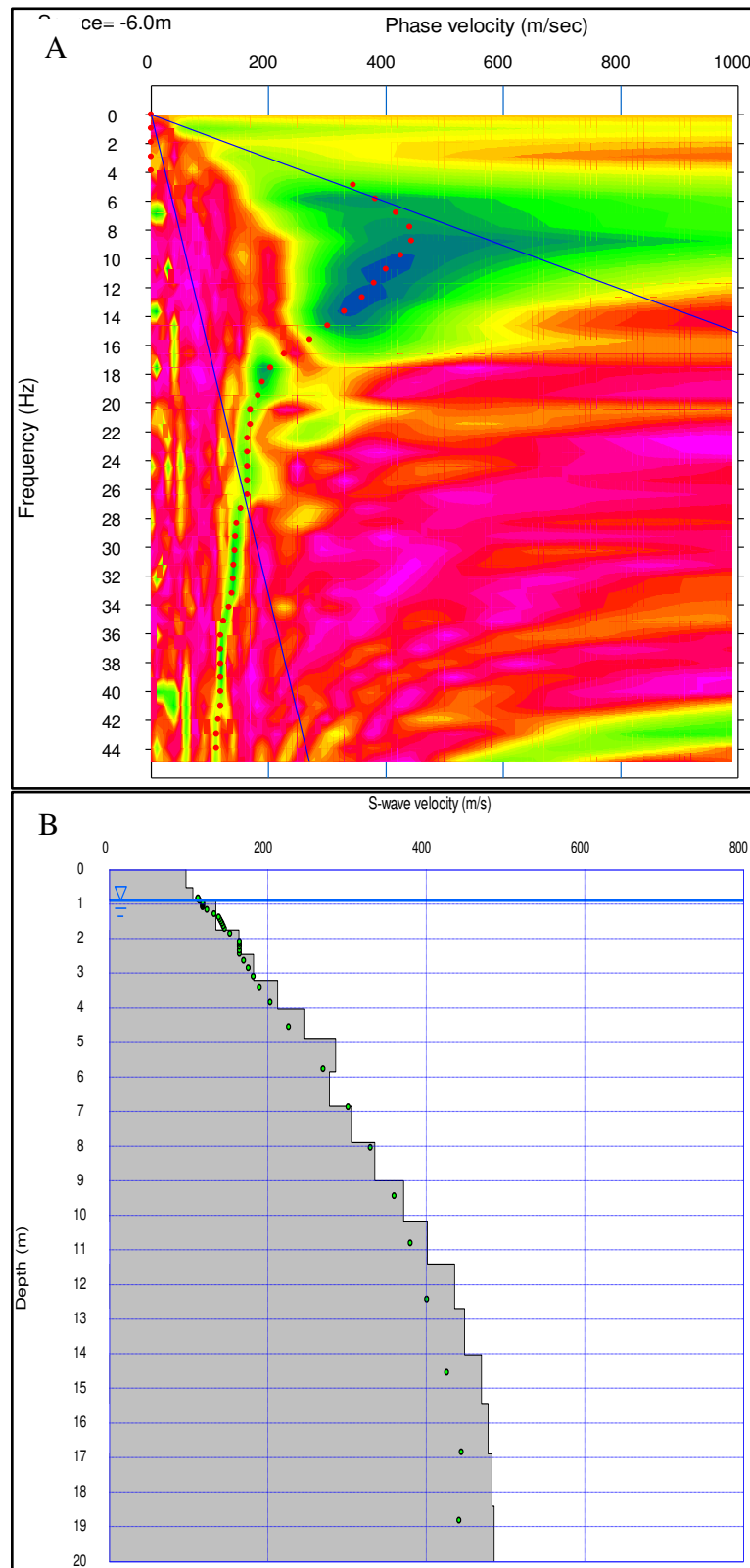


A) Imagen de Dispersión del ensayo MASW02. B) Perfil Vs 1D del ensayo MASW02.

3. Resultados gráficos de la línea sísmica RS03 y ensayo MASW03

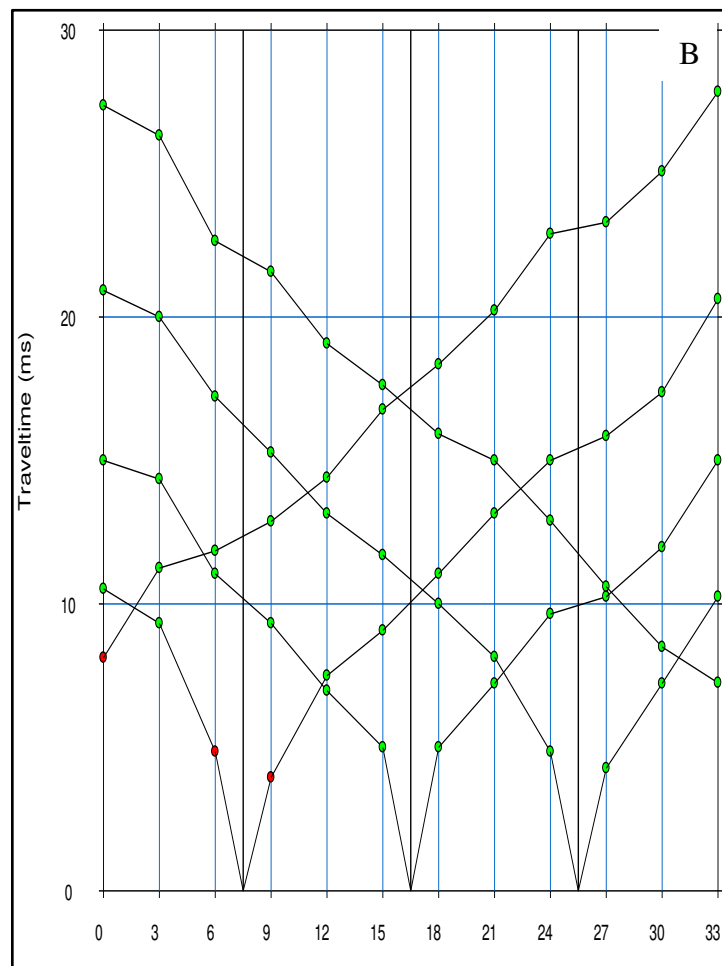
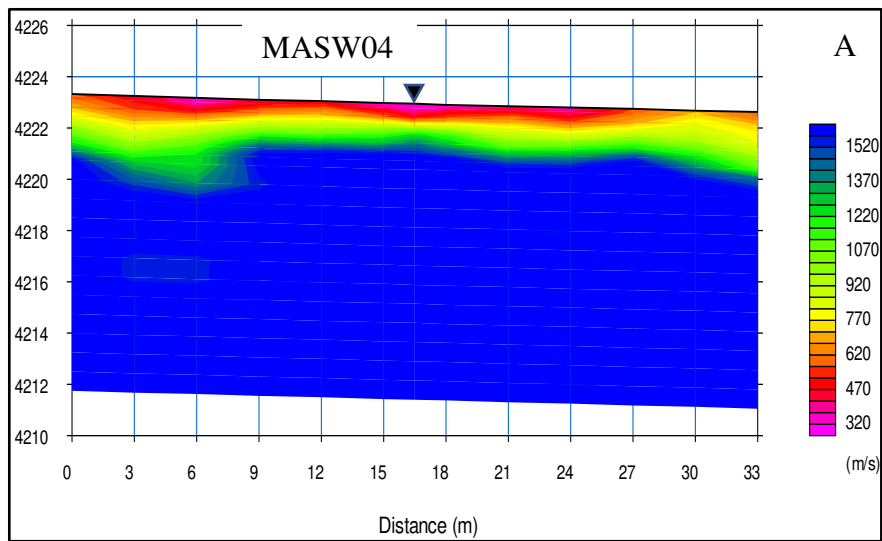


A) Tomografía sísmica de la línea RS03. B) Domocronas de la línea RS03.

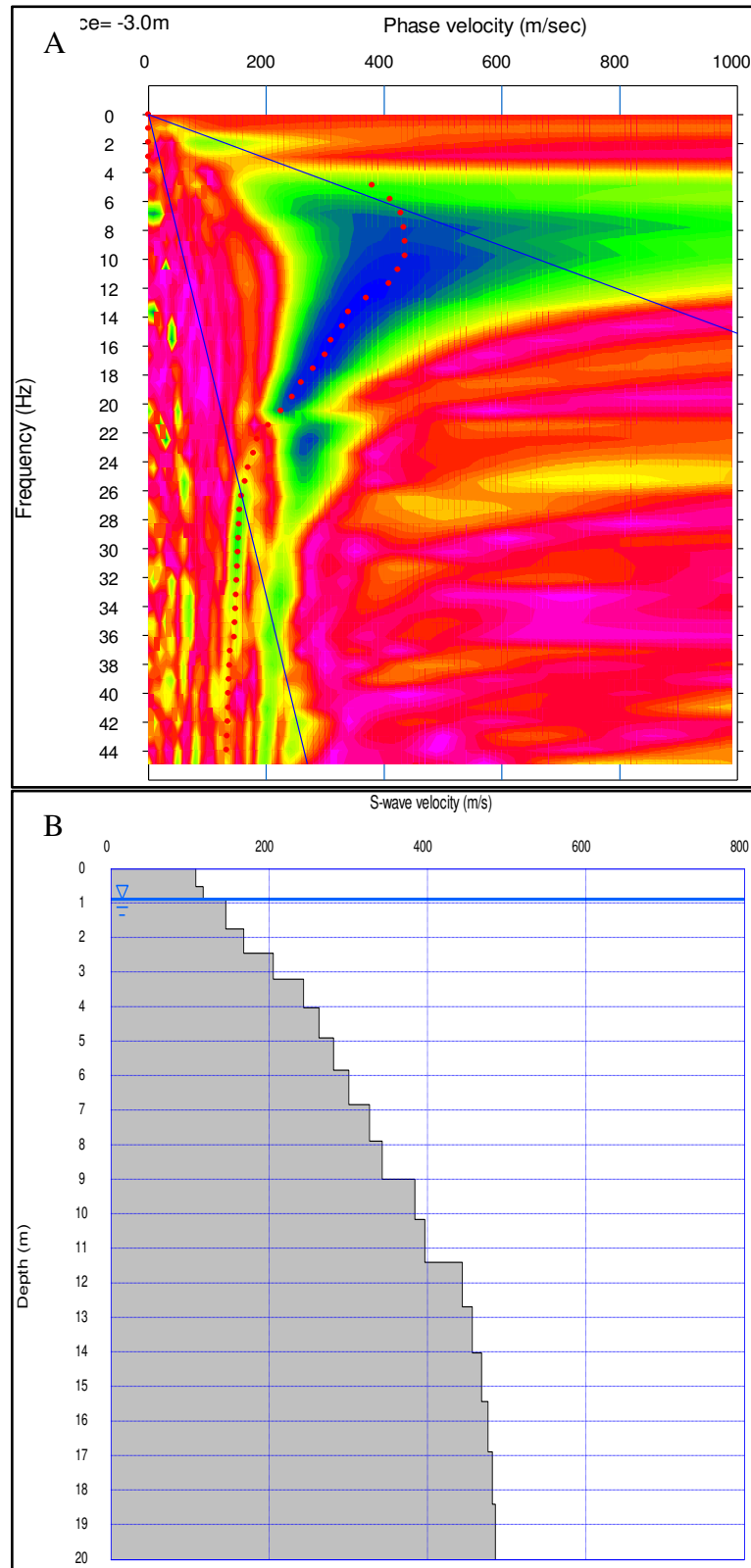


A) Imagen de Dispersión del ensayo MASW03. B) Perfil Vs 1D del ensayo MASW03.

4. Resultados gráficos de la línea sísmica RS04 y ensayo MASW04

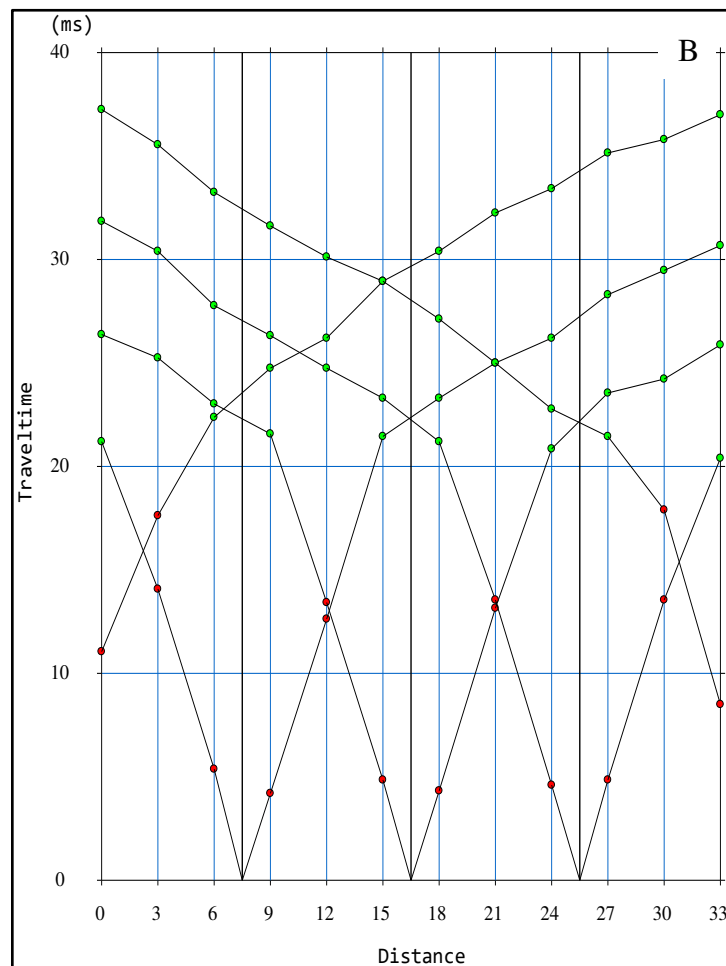
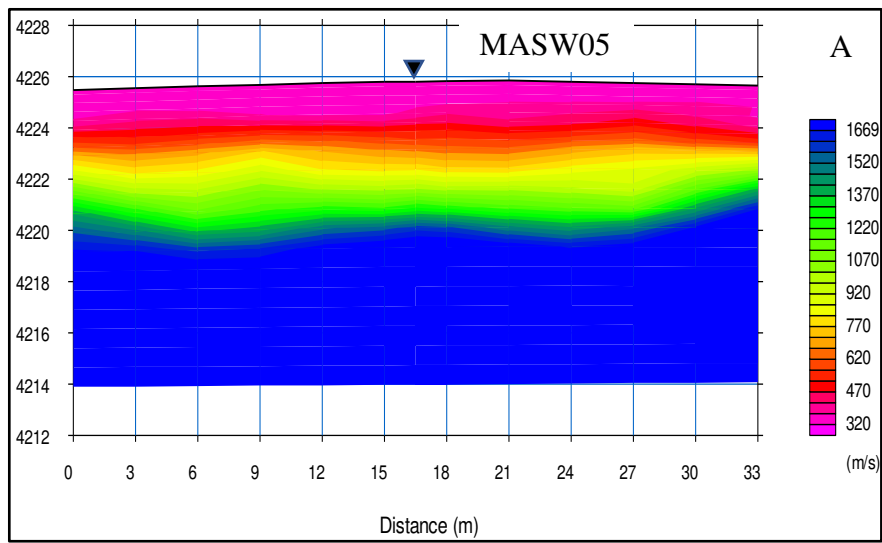


A) Tomografía sísmica de la línea RS04. B) Domocronas de la línea RS04.

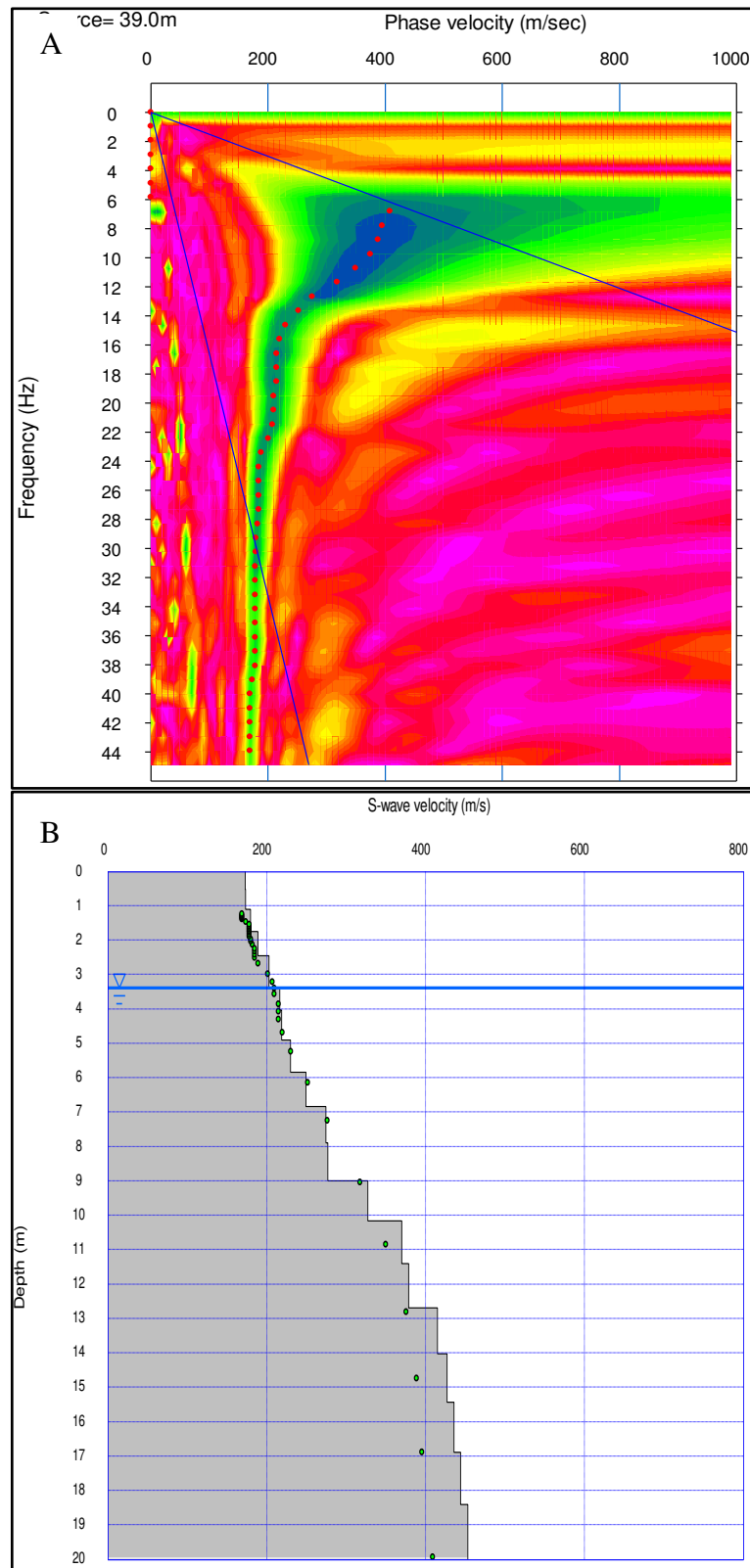


A) Imagen de Dispersión del ensayo MASW04. B) Perfil Vs 1D del ensayo MASW04.

5. Resultados gráficos de la línea sísmica RS05 y ensayo MASW05

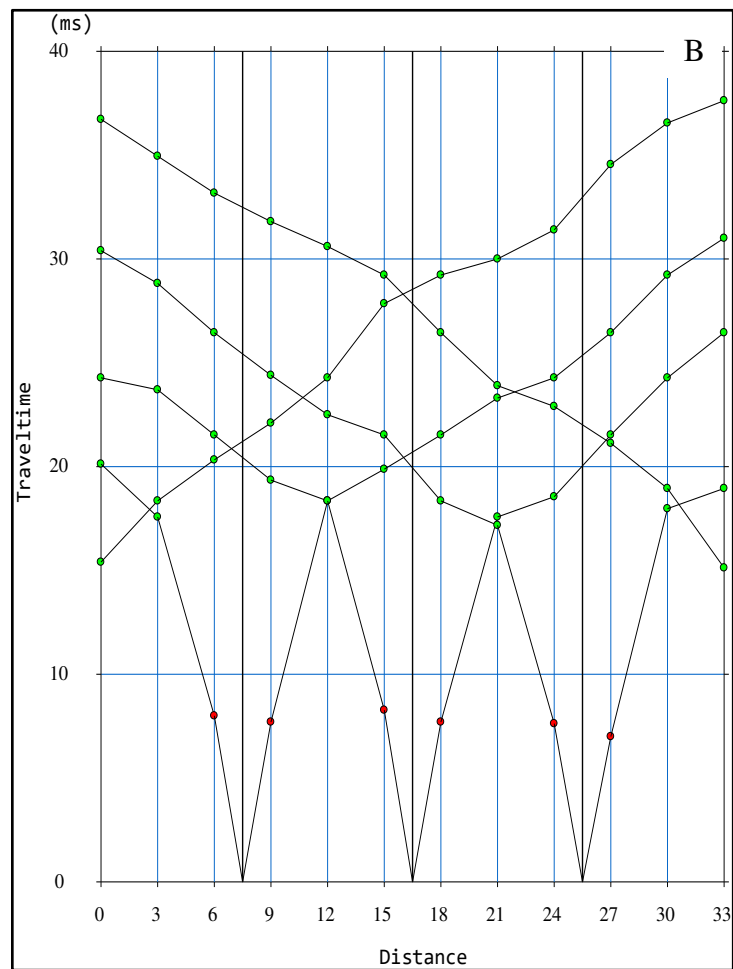
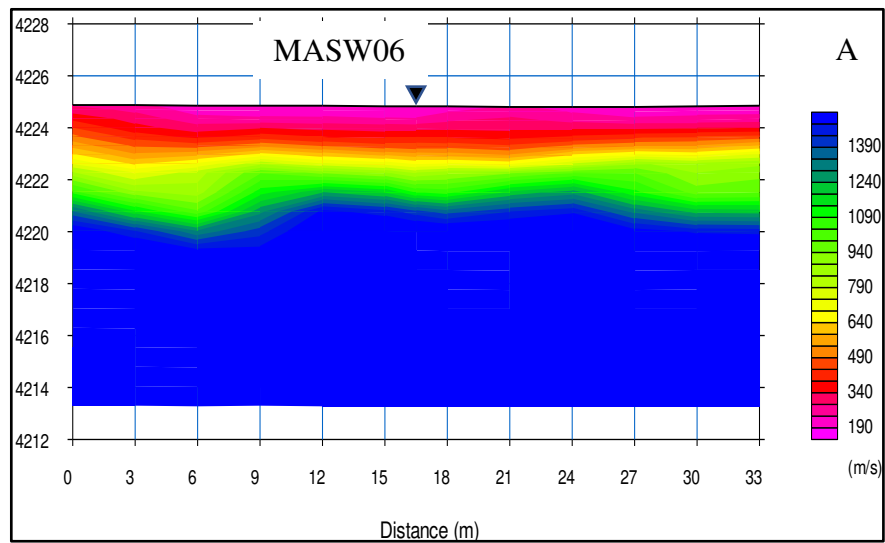


A) Tomografía sísmica de la línea RS05. B) Domocronas de la línea RS05.

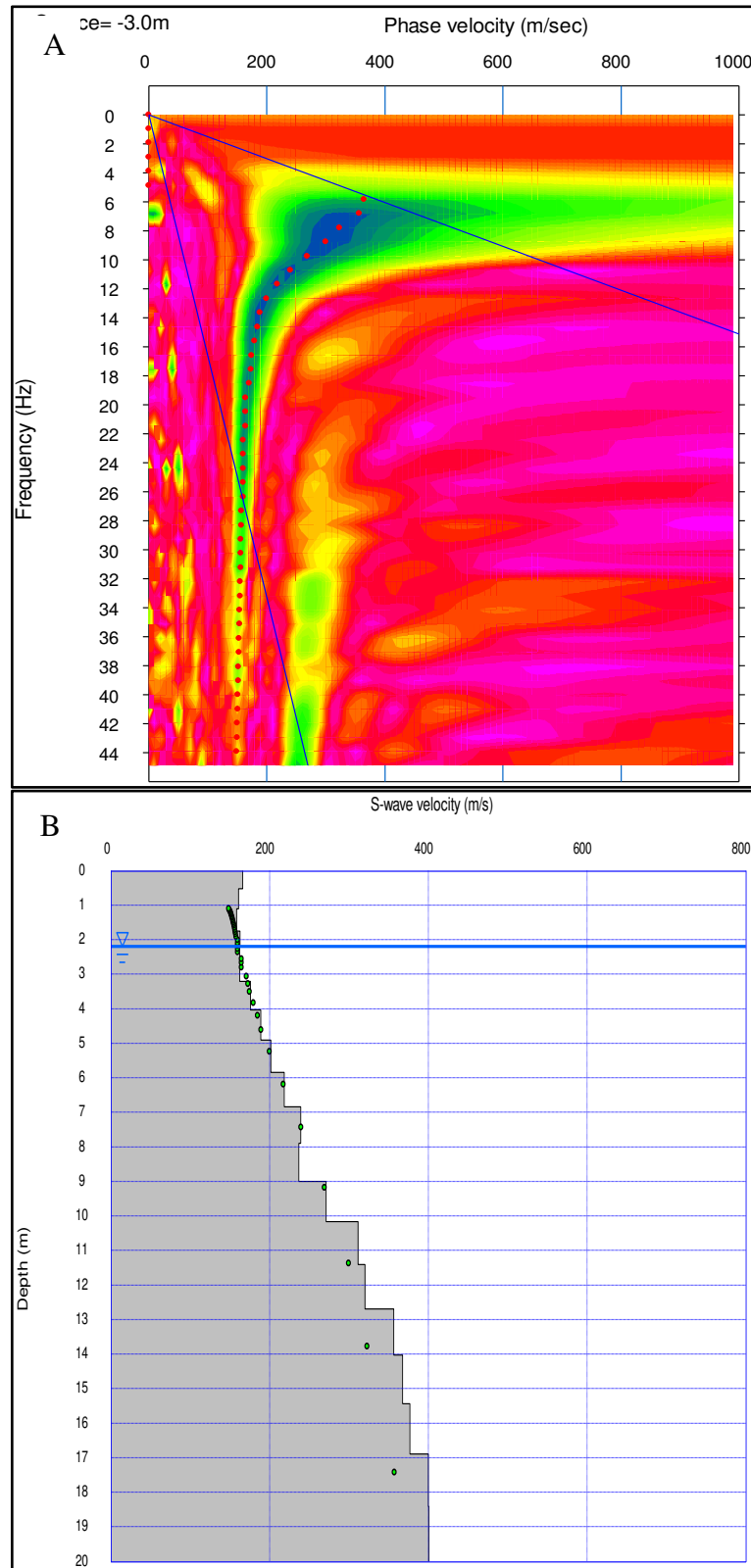


A) Imagen de Dispersión del ensayo MASW05. B) Perfil Vs 1D del ensayo MASW05.

6. Resultados gráficos de la línea sísmica RS06 y ensayo MASW06

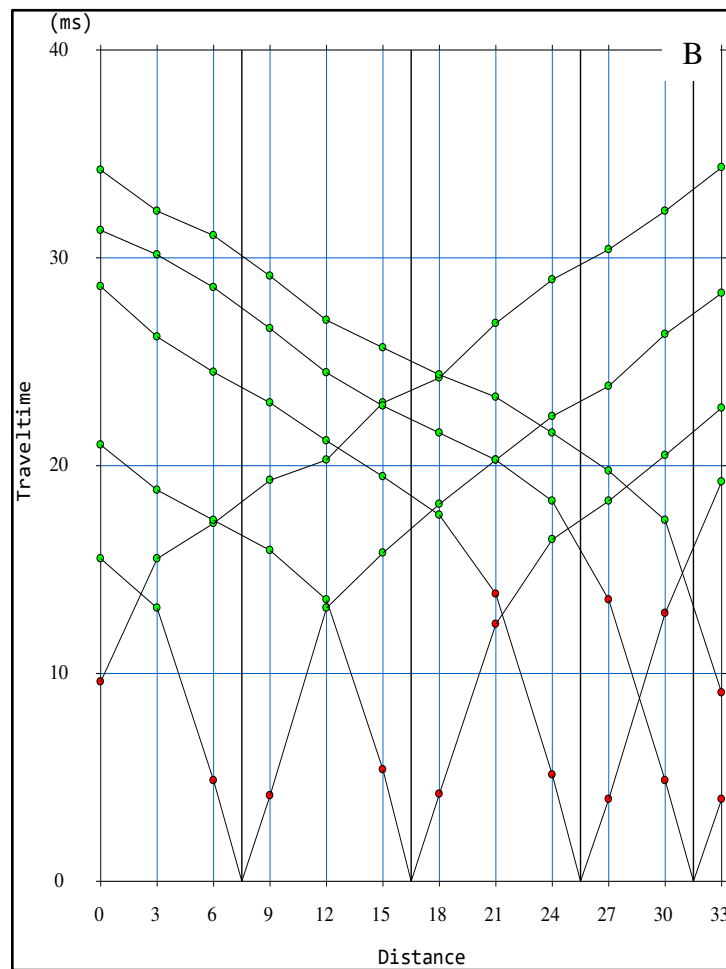
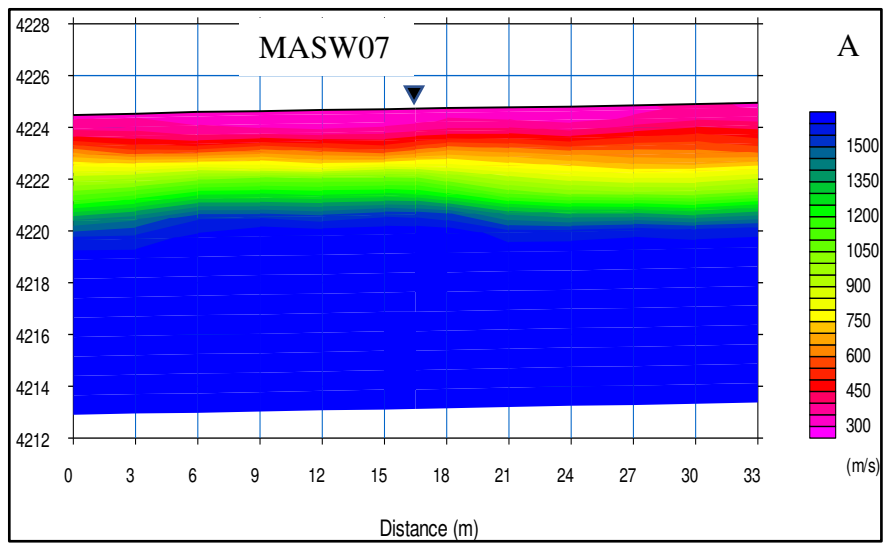


A) Tomografía sísmica de la línea RS06. B) Domocronas de la línea RS06.

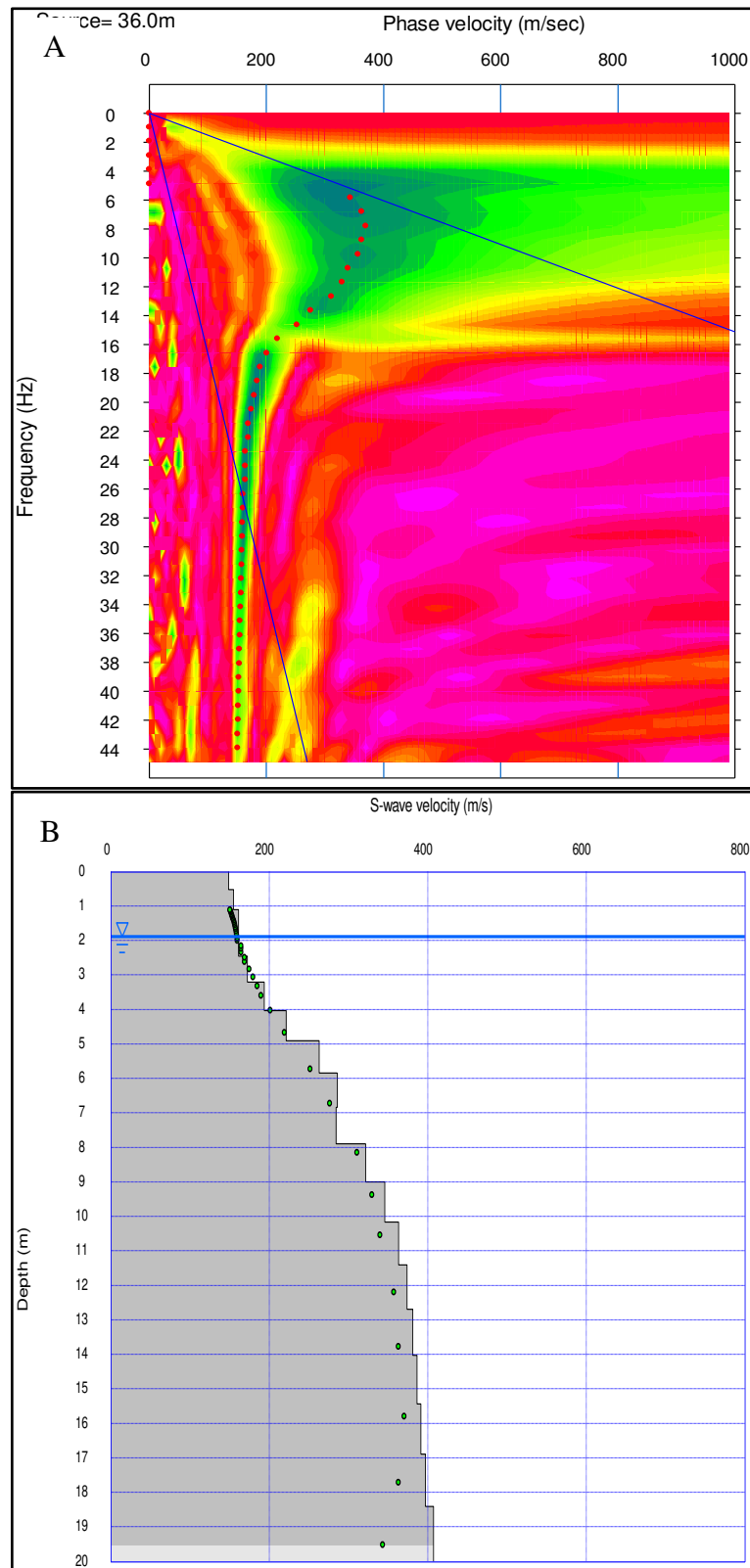


A) Imagen de Dispersión del ensayo MASW06. B) Perfil Vs 1D del ensayo MASW06.

7. Resultados gráficos de la línea sísmica RS07 y ensayo MASW07

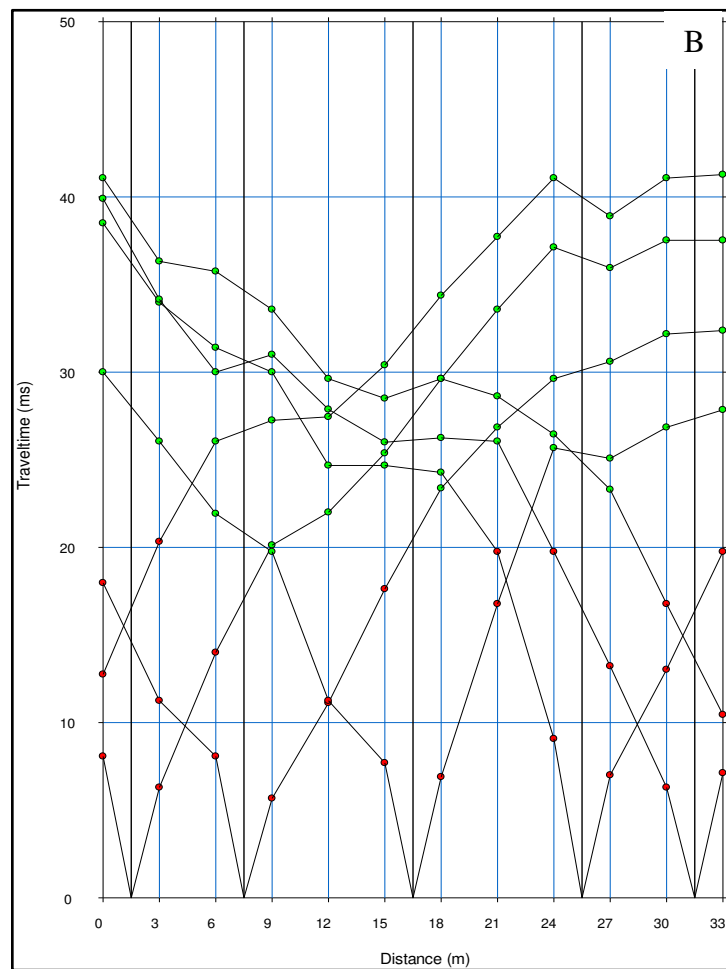
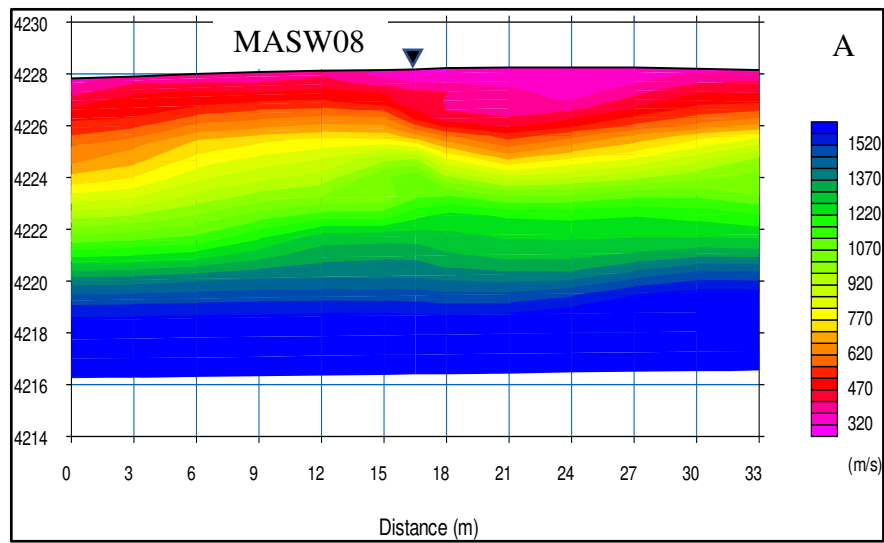


A) Tomografía sísmica de la línea RS07. B) Domocronas de la línea RS07.

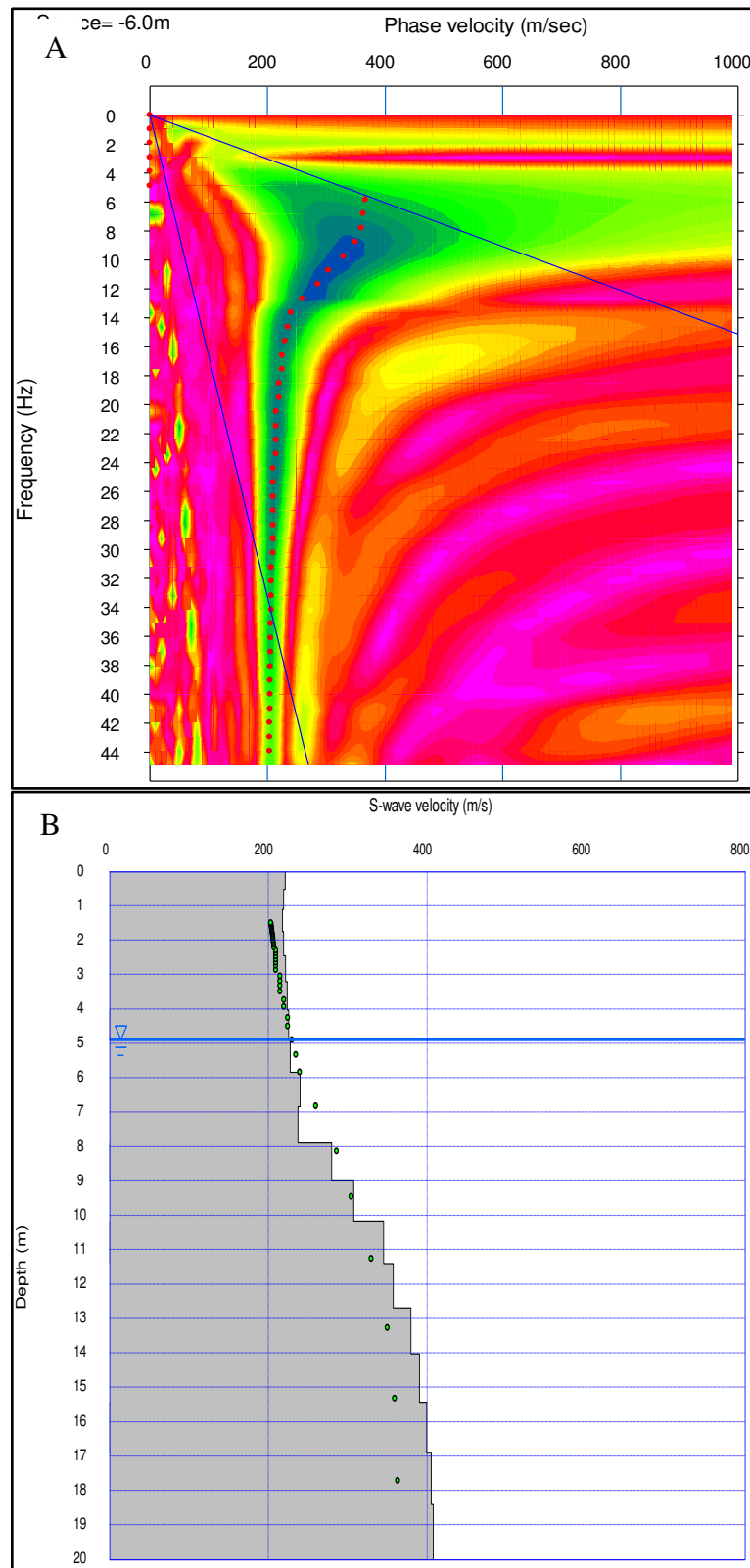


A) Imagen de Dispersión del ensayo MASW07. B) Perfil Vs 1D del ensayo MASW07.

8. Resultados gráficos de la línea sísmica RS08 y ensayo MASW08

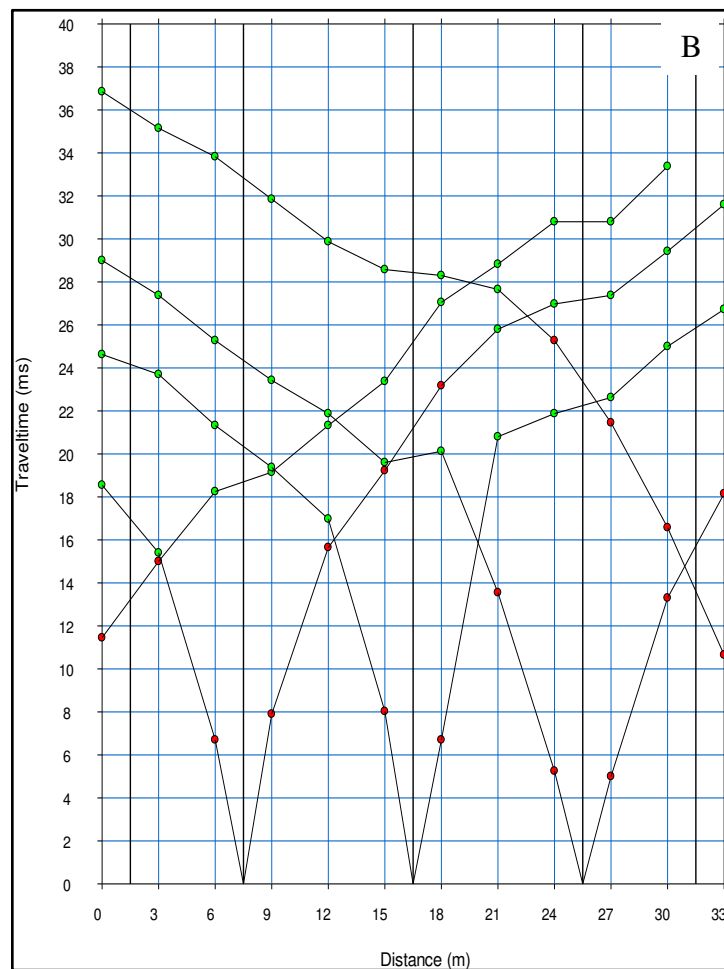
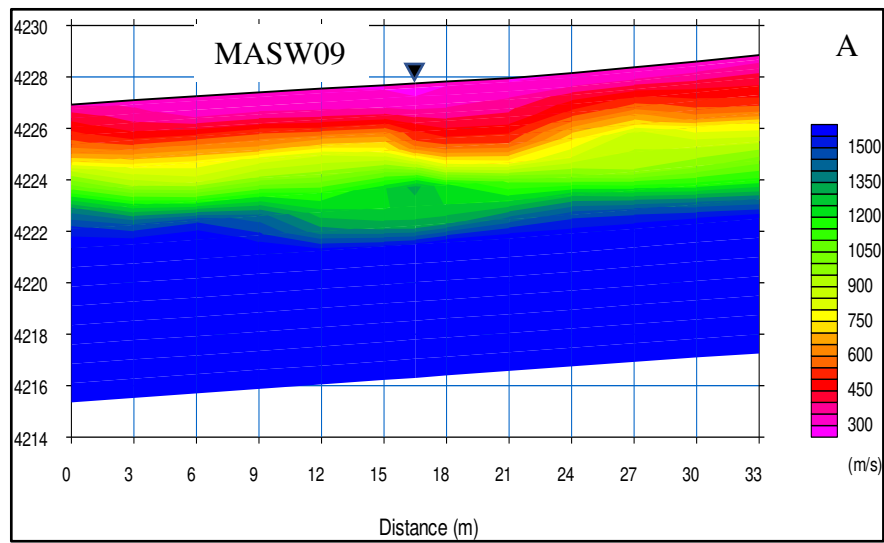


A) Tomografía sísmica de la línea RS08. B) Domocronas de la línea RS08.

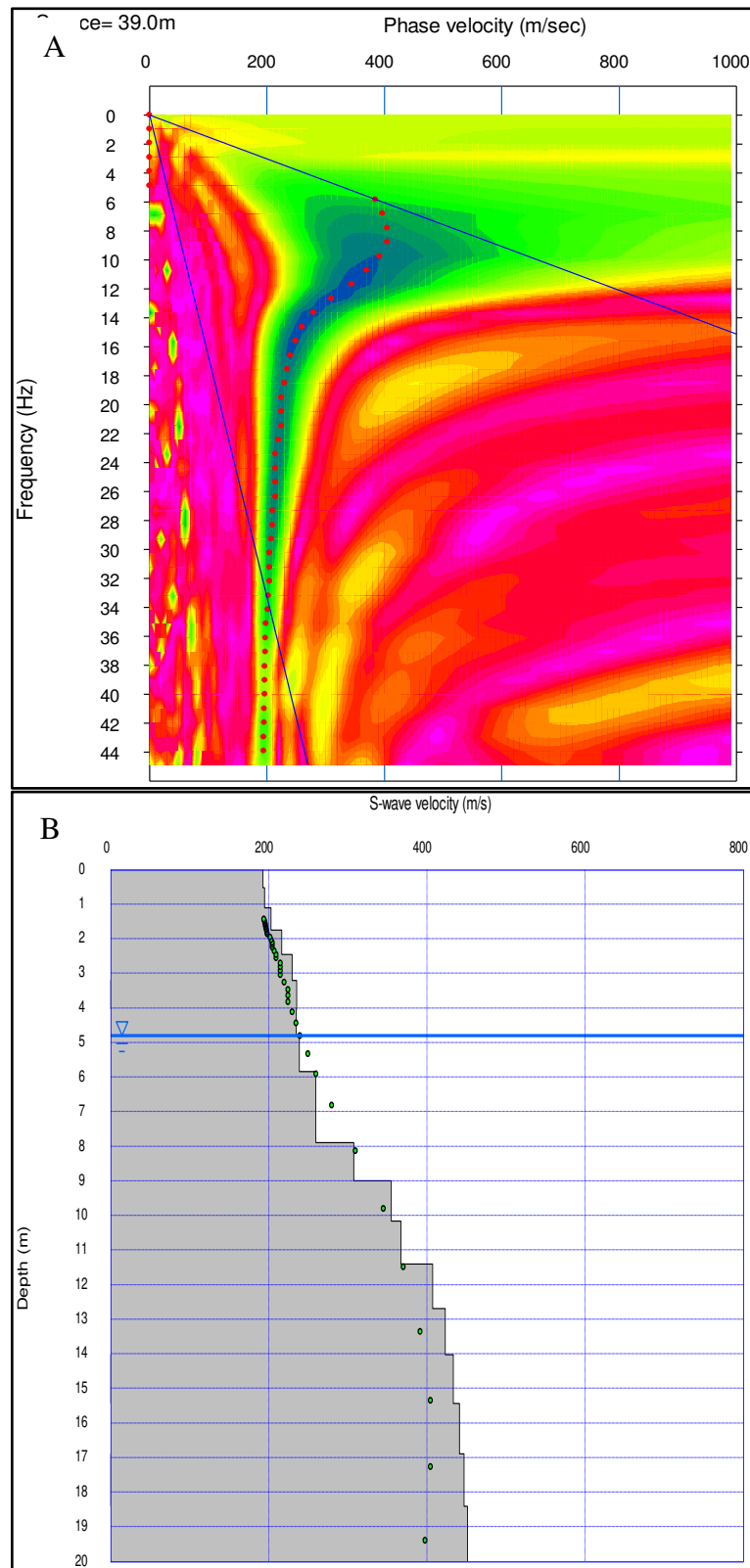


A) Imagen de Dispersión del ensayo MASW08. B) Perfil Vs 1D del ensayo MASW08.

9. Resultados gráficos de la línea sísmica RS09 y ensayo MASW09

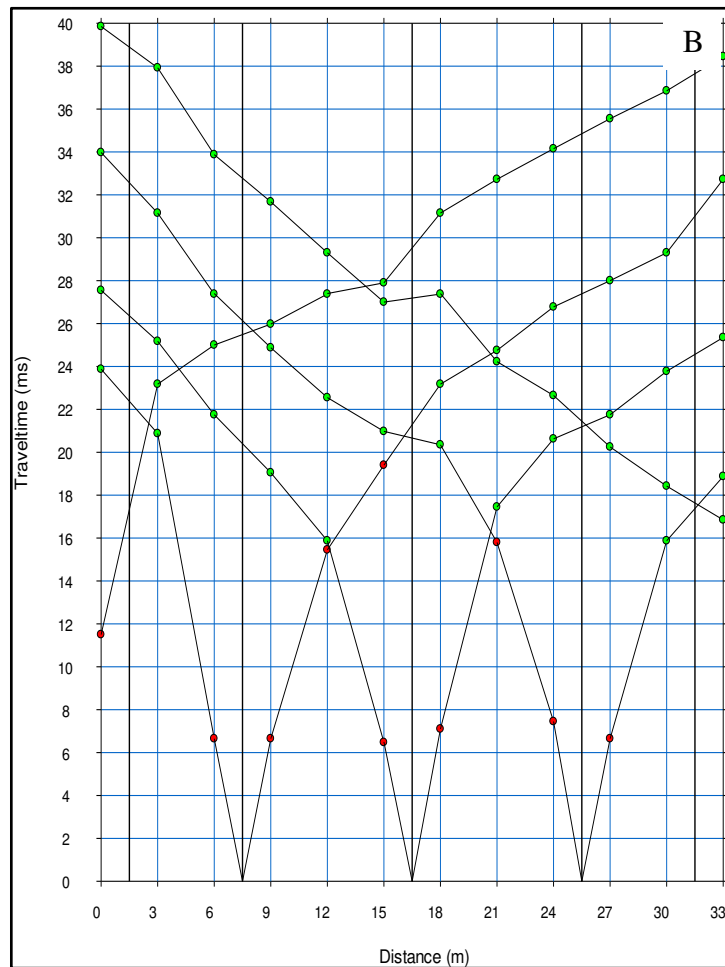
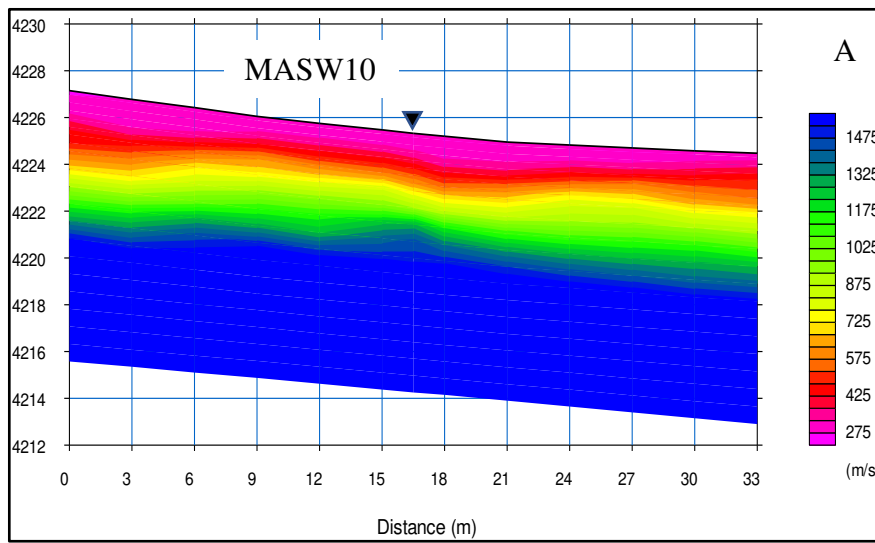


A) Tomografía sísmica de la línea RS09. B) Domocronas de la línea RS09.

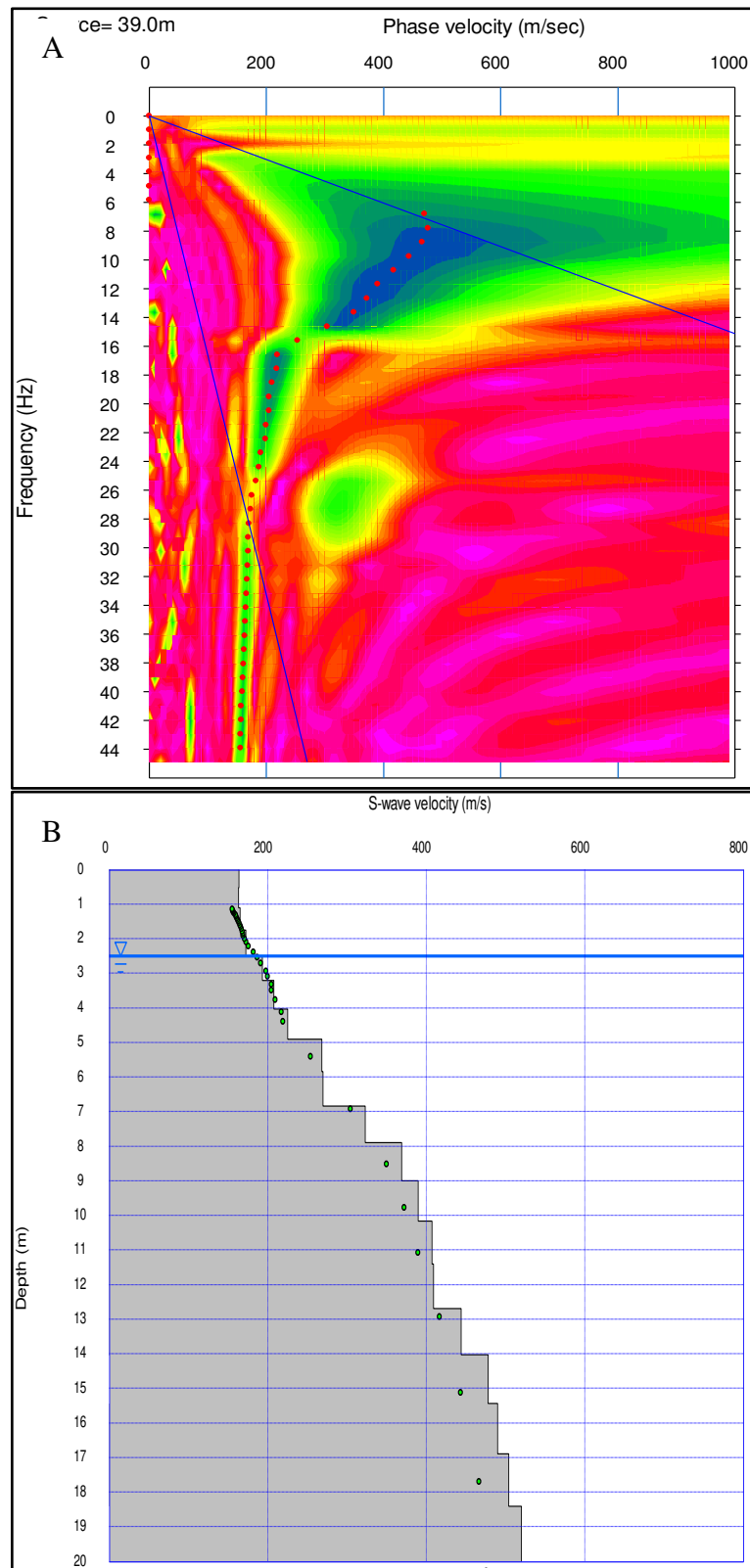


A) Imagen de Dispersión del ensayo MASW09. B) Perfil Vs 1D del ensayo MASW09.

10. Resultados gráficos de la línea sísmica RS10 y ensayo MASW10

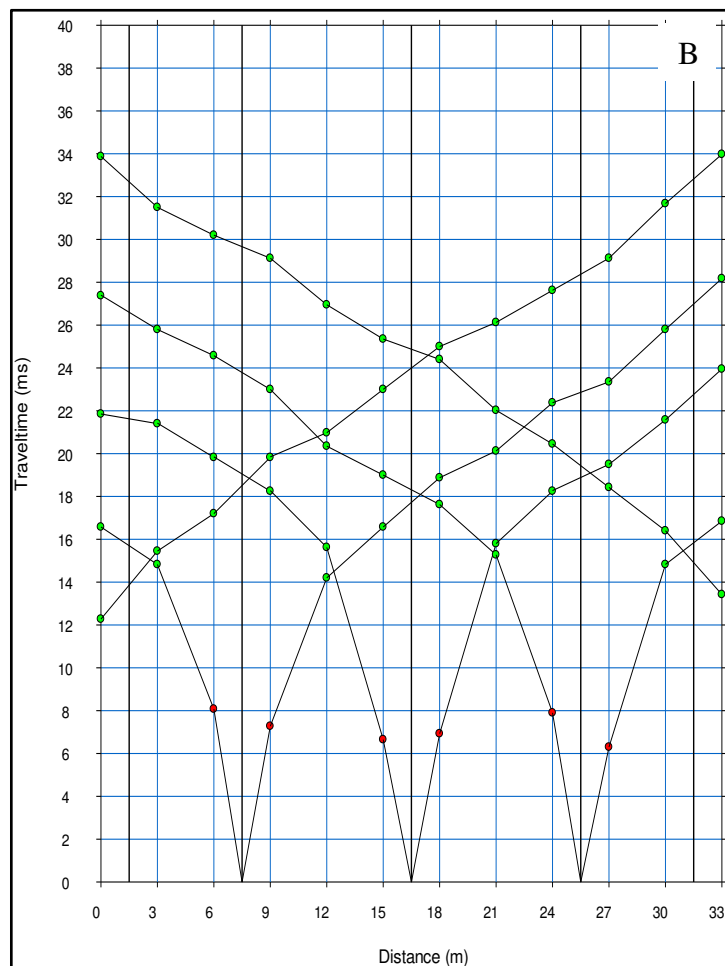
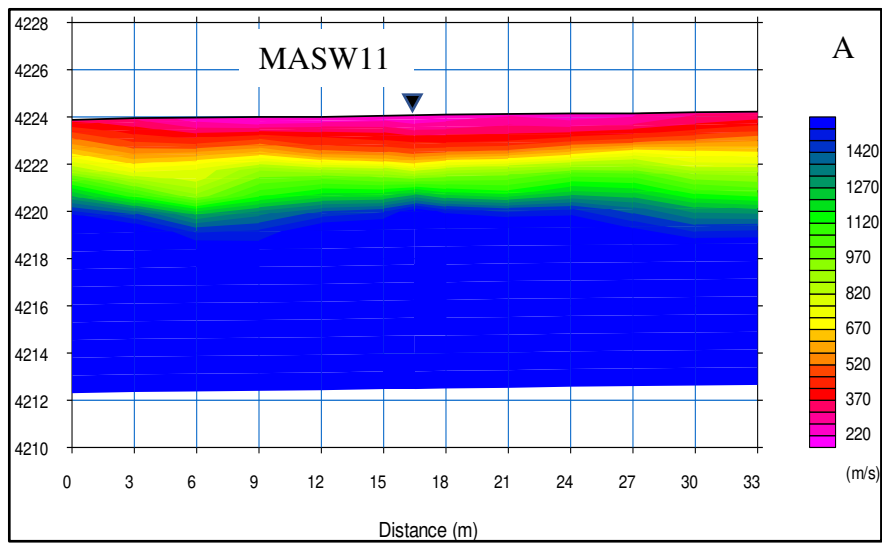


A) Tomografía sísmica de la línea RS10. B) Domocronas de la línea RS10.

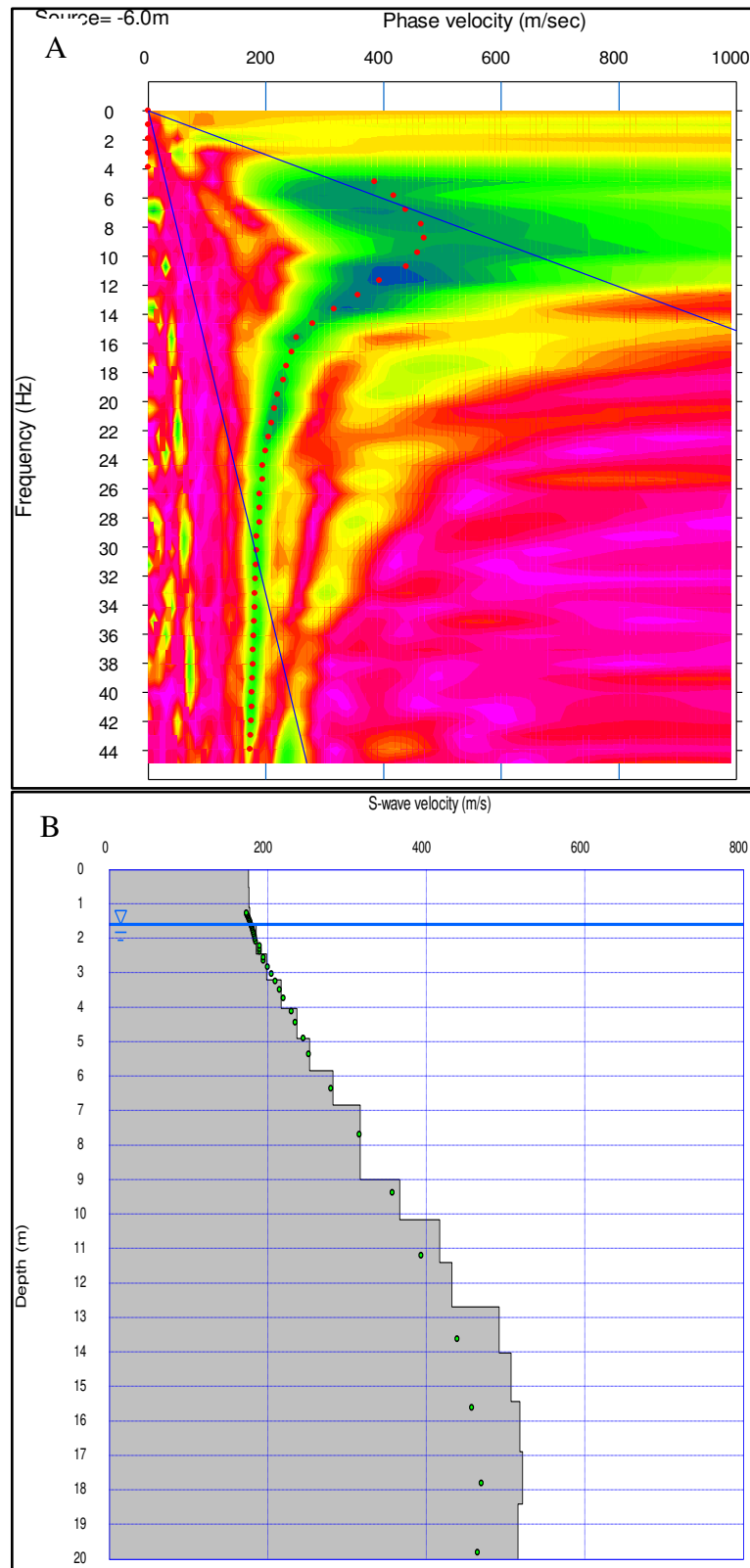


A) Imagen de Dispersión del ensayo MASW10. B) Perfil Vs 1D del ensayo MASW10.

11. Resultados gráficos de la línea sísmica RS11 y ensayo MASW11



A) Tomografía sísmica de la línea RS11. B) Domocronas de la línea RS11.



A) Imagen de Dispersión del ensayo MASW11. B) Perfil Vs 1D del ensayo MASW11.

ANEXO 3

ENSAYOS DE MECÁNICA DE SUELOS C-50 Y C-51

ANEXO 03-A: ENSAYO DE GRANULOMETRÍA CALICATA C-50

ANEXO 03-B: ENSAYO DE GRANULOMETRÍA CALICATA C-51

ANEXO 03-C: ENSAYO DE DENSIDAD RELATIVA CALICATA C-51

ANEXO 03-C: ENSAYO DE HUMEDAD CALICATA C-50 Y C-51

**ANÁLISIS MECÁNICO POR TAMIZADO
N° 01 ASTM D - 422 / NTP 339.127**

PROYECTO : " EXPEDIENTE TECNICO PLANTA DE BOMBEO OJOS COPAPUJO
META : 00026093 ESTUDIO DE EXPEDIENTE TECNICO
EJECUTA : GERENCIA DE ESTUDIOS Y PROYECTOS - PROYECTO ESPECIAL
 AFIANZAMIENTO DE RECURSOS HIDRICOS TACNA (P.E.T.)
SECTOR : MAMUTA
CALICATA : C-50

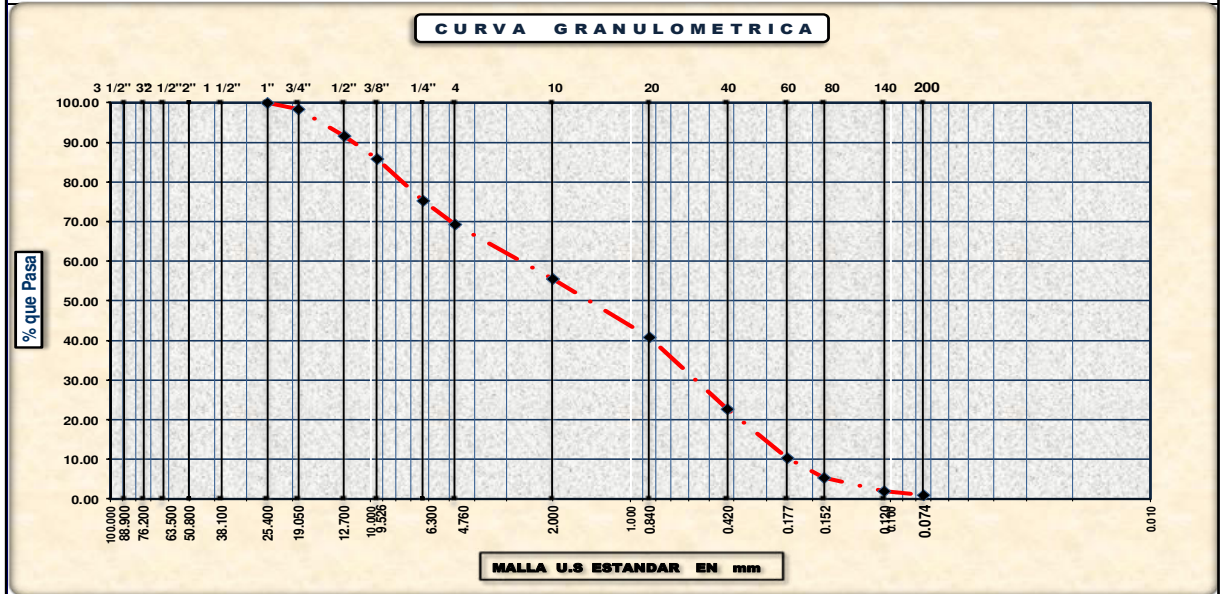
FECHA DE EJECUCIÓN : DICIEMBRE - 2015
COORD. ESTE WGS 84 : 418504
COORD. NORTE WGS 84 : 8089285

MALLA	MALLA (mm)	PESO RETENIDO	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
3 1/2"	90.000				
3"	75.000				
2 1/2"	63.000				
2"	50.000				
1 1/2"	37.500				
1"	25.000		0.00	0.00	100.00
3/4"	19.000	309.00	1.58	1.58	98.42
1/2"	12.700	1351.00	6.89	8.47	91.53
3/8"	9.500	1124.00	5.73	14.20	85.80
1/4"	6.300	2052.00	10.47	24.67	75.33
Nº 4	4.750	1185.00	6.04	30.71	69.29
Nº 8	2.380				
Nº 10	2.000	98.60	13.66	44.38	55.62
Nº 16	1.190				
Nº 20	0.850	106.50	14.76	59.13	40.87
Nº 30	0.590				
Nº 40	0.425	130.40	18.07	77.20	22.80
Nº 50	0.297				
Nº 60	0.250	90.20	12.50	89.70	10.30
Nº 80	0.180	35.50	4.92	94.62	5.38
Nº 140	0.106	24.40	3.38	98.00	2.00
Nº 200	0.075	7.10	0.98	98.99	1.01
< 200	0.073	7.30	1.01	100.00	0.00

OBSERVACIONES	
Peso muestra total (gr.)	19605.00
Peso ret. Malla Nº 4 (gr.)	6021.00
Peso Pste. Malla Nº 4 (gr.)	13584.00
peso fino del ensayo (gr.)	500.00
Ret. Malla de Nº 4 (%)	30.71
Pasante malla de Nº 4 (%)	69.29
Densidad máxima (gr/cm3)	
Humedad Optima (%)	
Limite liquido (%)	NP
Limite Plastico (%)	NP
índice de plasticidad (%)	NP
Contenido humedad (%)	
P.e.Retenido malla Nº 4	
P.e. Pasante.malla Nº 4	-

SUCS : SP

D10= 0.25 D30= 0.59 D60= 0.98
 Cc = 1.47
 Cu = 3.98



**ANÁLISIS MECÁNICO POR TAMIZADO
N° 01 ASTM D - 422 / NTP 339.127**

PROYECTO : " EXPEDIENTE TECNICO PLANTA DE BOMBEO OJOS COPAPUJO
META : 00026093 ESTUDIO DE EXPEDIENTE TECNICO
EJECUTA : GERENCIA DE ESTUDIOS Y PROYECTOS - PROYECTO ESPECIAL
 AFIANZIAMIENTO DE RECURSOS HIDRICOS TACNA (P.E.T.)
SECTOR : MAMUTA
CALICATA : C-51

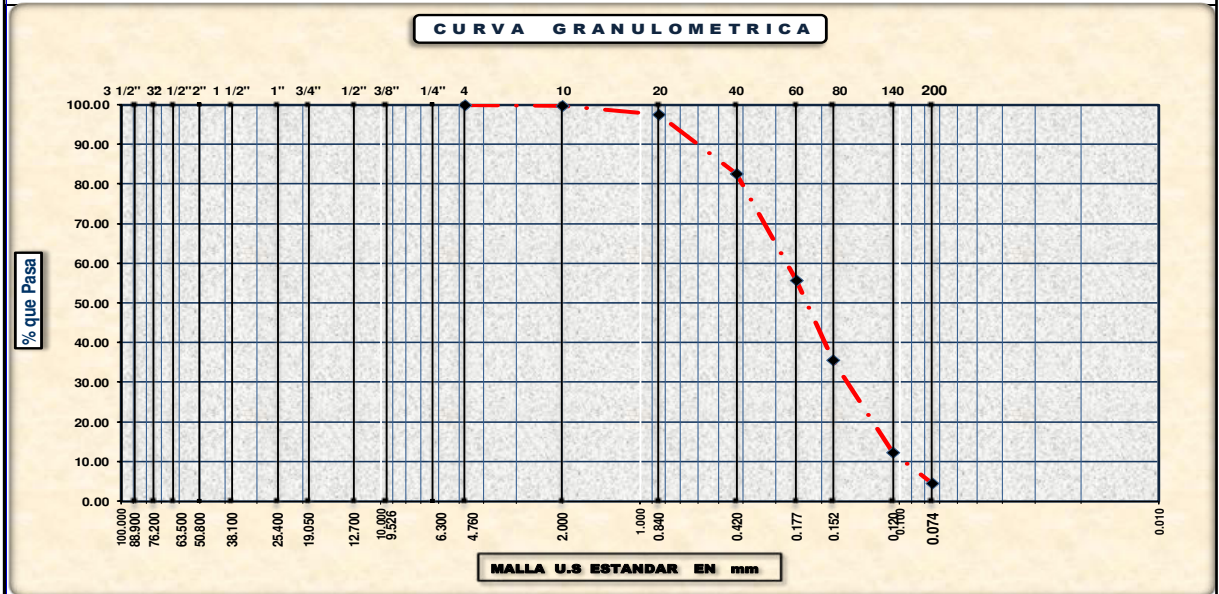
FECHA DE EJECUCIÓN : DICIEMBRE - 2015
COORD. ESTE WGS 84 : 418519
COORD. NORTE WGS 84 : 8089254

MALLA	MALLA (mm)	PESO RETENIDO	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
3 1/2"	90.000				
3"	75.000				
2 1/2"	63.000				
2"	50.000				
1 1/2"	37.500				
1"	25.000				
3/4"	19.000				
1/2"	12.700				
3/8"	9.500				
1/4"	6.300				
Nº 4	4.750		0.00	0.00	100.00
Nº 8	2.380				
Nº 10	2.000	1.30	0.26	0.26	99.74
Nº 16	1.190				
Nº 20	0.850	11.20	2.24	2.50	97.50
Nº 30	0.590				
Nº 40	0.425	74.10	14.82	17.32	82.68
Nº 50	0.297				
Nº 60	0.250	135.40	27.08	44.40	55.60
Nº 80	0.180	100.10	20.02	64.42	35.58
Nº 140	0.106	116.40	23.28	87.70	12.30
Nº 200	0.075	39.40	7.88	95.58	4.42
< 200	0.073	22.10	4.42	100.00	0.00

OBSERVACIONES	
Peso muestra total (gr.)	500.00
Peso ret. Malla Nº 4 (gr.)	0.00
Peso Pste. Malla Nº 4 (gr.)	500.00
peso fino del ensayo (gr.)	500.00
Ret. Malla de Nº 4 (%)	0.00
Pasante malla de Nº 4 (%)	100.00
Densidad máxima (gr/cm3)	
Humedad Óptima (%)	
Limite líquido (%)	NP
Limite Plástico (%)	NP
índice de plasticidad (%)	NP
Contenido humedad (%)	
P.e.Retenido malla Nº 4	
P.e. Pasante.malla Nº 4	-

SUCS : SP

D10= 0.10 D30= 0.16 D60= 0.28
Cc = 0.98
Cu = 2.87



DENSIDAD RELATIVA

PROYECTO : EXPEDIENTE TECNICO PLANTA DE BOMBEO OJOS COPAPUJO
META : 00026093 ESTUDIO DE EXPEDIENTE TECNICO
CLIENTE : CONSORCIO UGARTE
EJECUTA : GERENCIA DE ESTUDIOS Y PROYECTOS - PROYECTO ESPECIAL AFIANZAMIENTO DE RECURSOS HIDRICOS TACNA (P.E.T.)
SECTOR : MAMUTA
FECHA : DICIEMBRE 2015

DENSIDAD N°		UNIDAD	1			
CALICATA		N°	C-51			
COORDENADAS		ESTE	418519			
		NORTE	8089254			
UBICACIÓN		N°	Fondo			
PROFUNDIDAD		m.	0.14			
A.- DENSIDAD DE CAMPO						
1	PESO ARENA + FRASCO	gr.	7530			
2	PESO ARENA QUE QUEDA EN EL FRASCO	gr.	3330			
3	PESO DE LA ARENA EN EL CONO	gr.	1671			
4	PESO DE LA ARENA EN LA CAVIDAD (1-2-3)	gr.	2529			
5	DENSIDAD DE LA ARENA	gr./cm3	1.475			
6	VOLUMEN DE LA CAVIDAD (4/5)	cm3.	1715			
7	PESO MUESTRA HUMEDA + TARA	gr.	3270			
8	PESO DE LA TARA	gr.	185			
9	PESO MUESTRA HUMEDA NETA (7-8)	gr.	3085.00			
10	PESO MUESTRA SECA NETA $(9*100)/(100+24)$	gr.	2933.11			
11	PESO SUELO RETENIDO EN TAMÍZ N°4	gr.	675			
12	PESO ESPECIFICO SUELO RETENIDO EN TAMÍZ N°4	gr/cm3	2.370			
13	VOLUMEN SUELO RETENIDO EN TAMIZ N° 4 (11/12)	cm3.	285			
14	PESO SUELO PASANTE TAMIZ N° 4 (10-11)	gr.	2258.11			
15	VOLUMEN SUELO PASANTE TAMIZ N° 4 (6-13)	cm3.	1429.77			
16	PORCENTAJE SUELO RETENIDO EN TAMIZ N° 4 $(11*100/10)$	%	23.01			
17	PORCENTAJE SUELO PASANTE TAMIZ N° 4 $(14*100/10)$	%	76.99			
B.- HUMEDAD ASTM D 2216 - 92						
18	N° DE TARA		P-397			
19	PESO DE LA TARA	gr.	24.40			
20	PESO SUELO HUMEDO + TARA	gr.	115.80			
21	PESO SUELO SECO + TARA	gr.	111.30			
22	PESO DEL AGUA (17-18)	gr.	4.50			
23	PESO DEL SUELO SECO (18-16)	gr.	86.90			
24	CONTENIDO DE HUMEDAD $(100*22/23)$	%	5.18			
C.- GRADO DE COMPACTACION						
25	DENSIDAD DEL SUELO HUMEDO (9/6)	gr./cm3	1.799			
26	DENSIDAD SECA DE CAMPO $(100*25/100+24)$	gr./cm3	1.711			
27	DENSIDAD MAXIMA	gr./cm3	1.868			
28	DENSIDAD MINIMA	gr./cm3	1.624			
29	DENSIDAD RELATIVA $(100* (27*(26-28))/(26*(27-28)))$	%	39			
30	ANGULO DE FRICCION (ϕ)	ϕ°	30.82			

**ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD
ASTM D-2216-92**

PROYECTO : EXPEDIENTE TECNICO PLANTA DE BOMBEO OJOS COPAPUJO
META : 00026093 ESTUDIO DE EXPEDIENTE TECNICO
CLIENTE : CONSORCIO UGARTE
EJECUTA : GERENCIA DE ESTUDIOS Y PROYECTOS - PROYECTO ESPECIAL AFIANZIAMIENTO DE RECURSOS HIDRICOS TACNA
SECTOR : MAMUTA
FECHA : DICIEMBRE 2015

DESCRIPCION	UNIDAD	CALICATAS							
			C-50	C-50A	C-51				
HUMEDAD ASTM D 2216 - 92									
1	TARA Nº	Tara		P-397	P-399	P-397			
2	PESO DE LA TARA	gr.		24.40	25.20	24.40			
3	PESO SUELO HUMEDO + TARA	gr.		132.70	132.40	115.80			
4	PESO SUELO SECO + TARA	gr.		124.20	124.50	111.30			
5	PESO DEL AGUA	gr.		8.50	7.90	4.50			
6	PESO DEL SUELO SECO	gr.		99.80	99.30	86.90			
7	CONTENIDO DE HUMEDAD	%		8.52	7.96	5.18			

ANEXO 04

INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA E INTERPOLACIONES DE V_p y V_s

ANEXO 04: INTERPOLACIÓN DE V_s EN LA COTA 4219

ANEXO 04-A: SECCIÓN AA' - INTERPOLACIÓN DE V_p

ANEXO 04-B: SECCIÓN AA' - INTERPOLACIÓN DE V_s

ANEXO 04-C: SECCIÓN AA' - INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LA
PROSPECCIÓN SÍSMICA

ANEXO 04-D: SECCIÓN BB' - INTERPOLACIÓN DE V_p

ANEXO 04-E: SECCIÓN BB' - INTERPOLACIÓN DE V_s

ANEXO 04-F: SECCIÓN BB' - INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LA
PROSPECCIÓN SÍSMICA

ANEXO 04-G: SECCIÓN CC' - INTERPOLACIÓN DE V_p

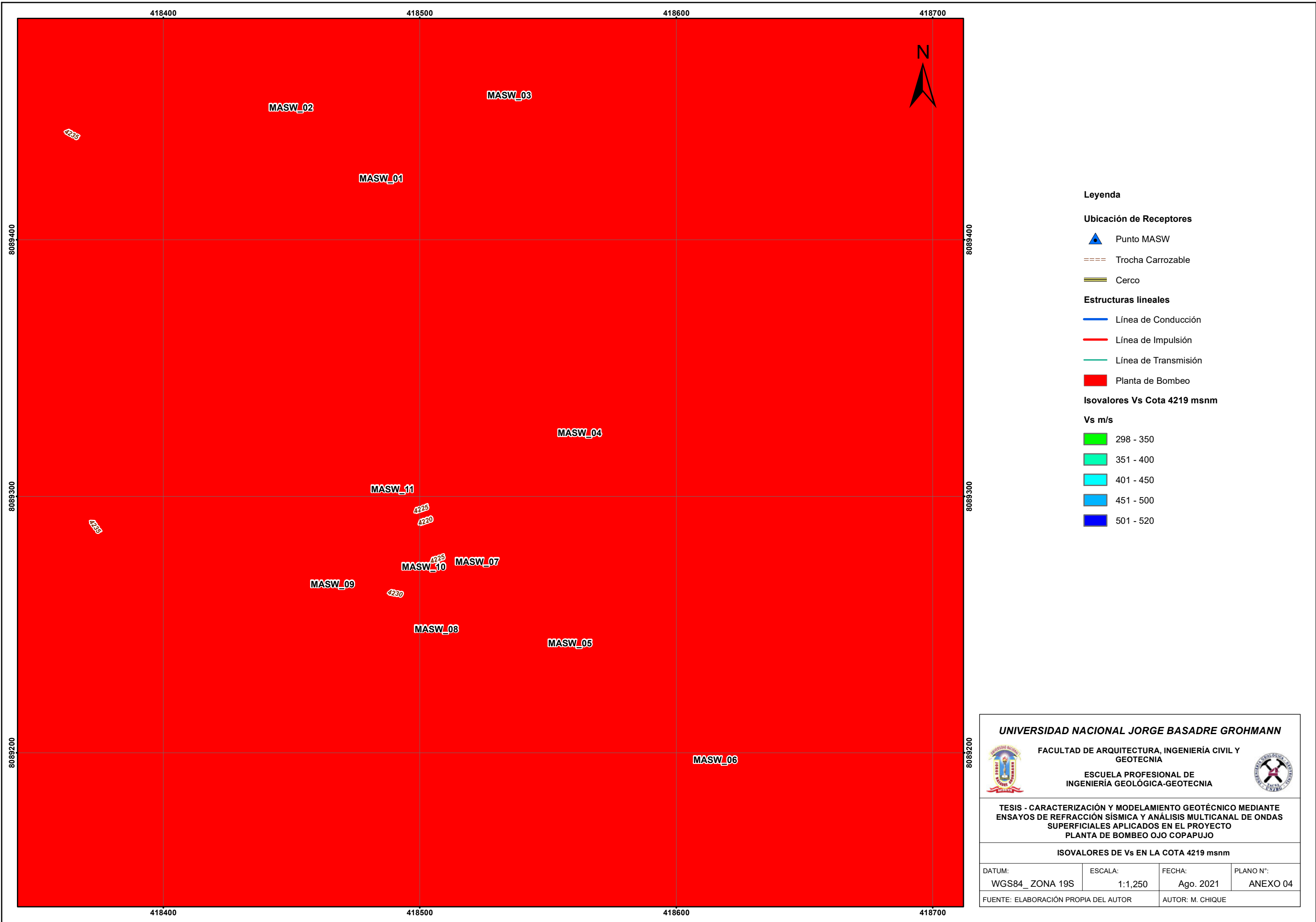
ANEXO 04-H: SECCIÓN CC' - INTERPOLACIÓN DE V_s

ANEXO 04-I: SECCIÓN CC' - INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LA
PROSPECCIÓN SÍSMICA

ANEXO 04-J: SECCIÓN DD' - INTERPOLACIÓN DE V_p




ANEXO 04-K: SECCIÓN DD' - INTERPOLACIÓN DE V_s

ANEXO 04-L: SECCIÓN DD' - INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LA
PROSPECCIÓN SÍSMICA







Leyenda

Ubicación de Receptores






-  Punto MASW
-  Trocha Carrozable
-  Cerco

Estructuras lineales

-  Línea de Conducción
-  Línea de Impulsión
-  Línea de Transmisión
-  Planta de Bombeo

Isovalores Vs Cota 4219 msnm

Vs m/s

-  298 - 350
-  351 - 400
-  401 - 450
-  451 - 500
-  501 - 520

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

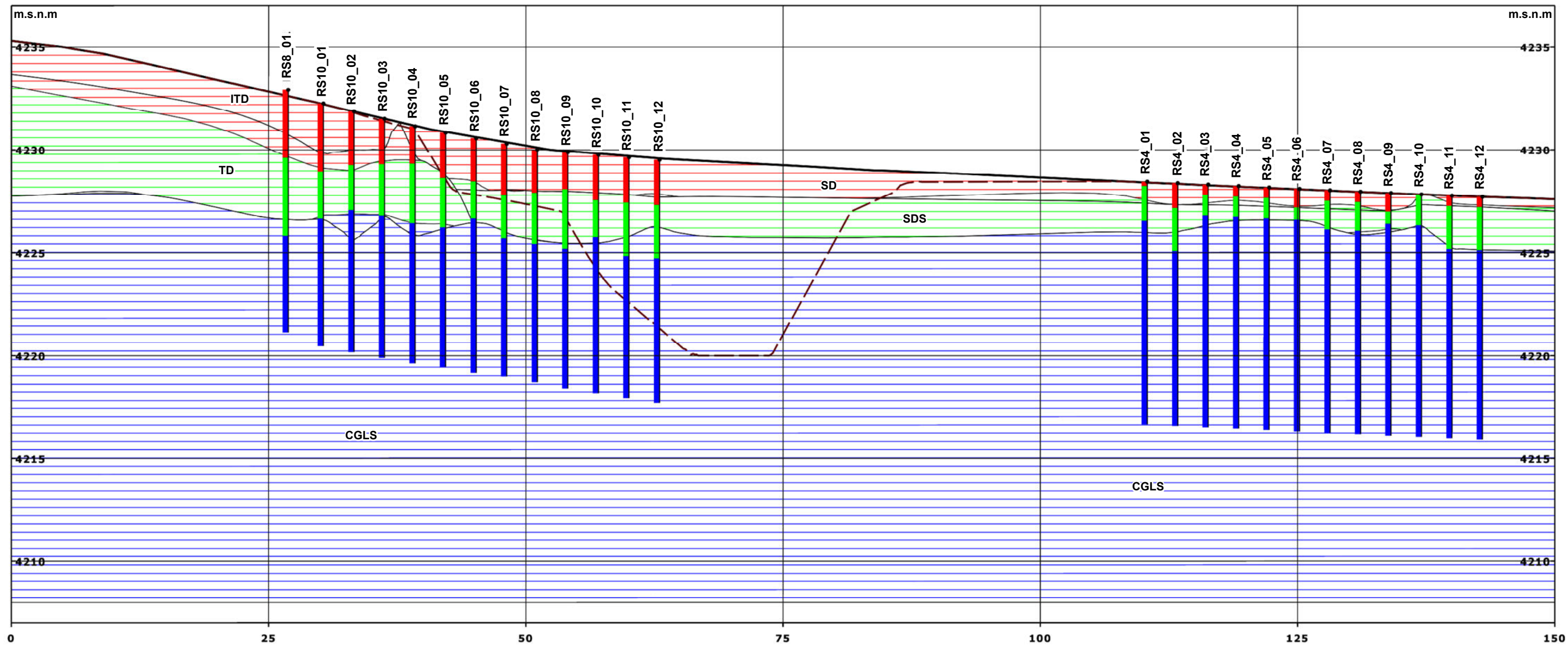
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

ISOVALORES DE Vs EN LA COTA 4219 msnm

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:1,250	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 04
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	

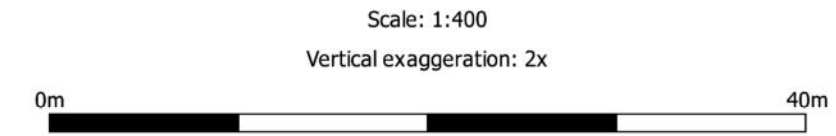
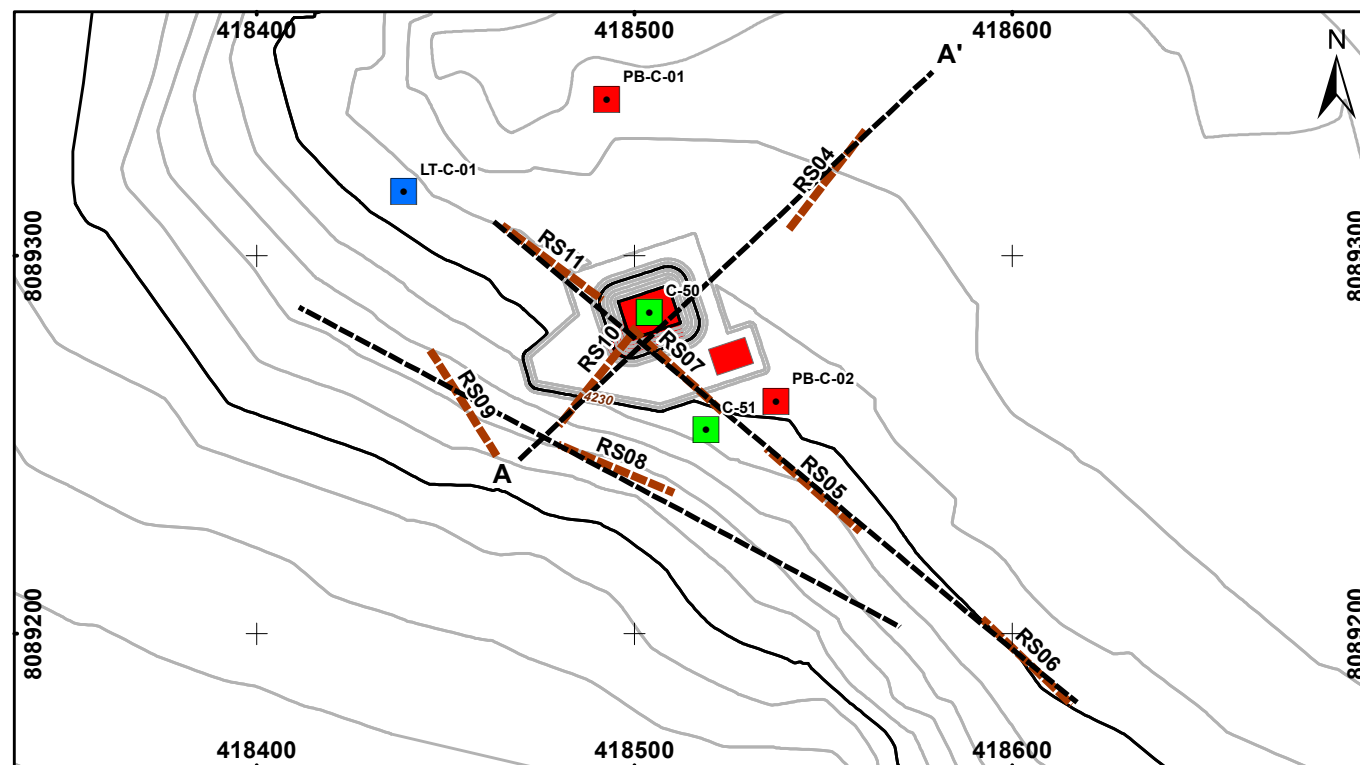
Sección AA': Interpolación Vp



Superficies
 — Topografía
 - - - Corte para movimiento de tierra

Vp_m/s
 ■ ≤ 650 : 1era Capa
 ■ ≤ 1250 : 2da Capa
 ■ > 1250 : 3ra Capa

Litología	Min_Vp m/s	Max_Vp m/s	Promedio m/s
SD	216	700	483
ITD	312	414	374
SDS	550	1310	964
TD	520	1300	961
CGLS	1350	1670	1636



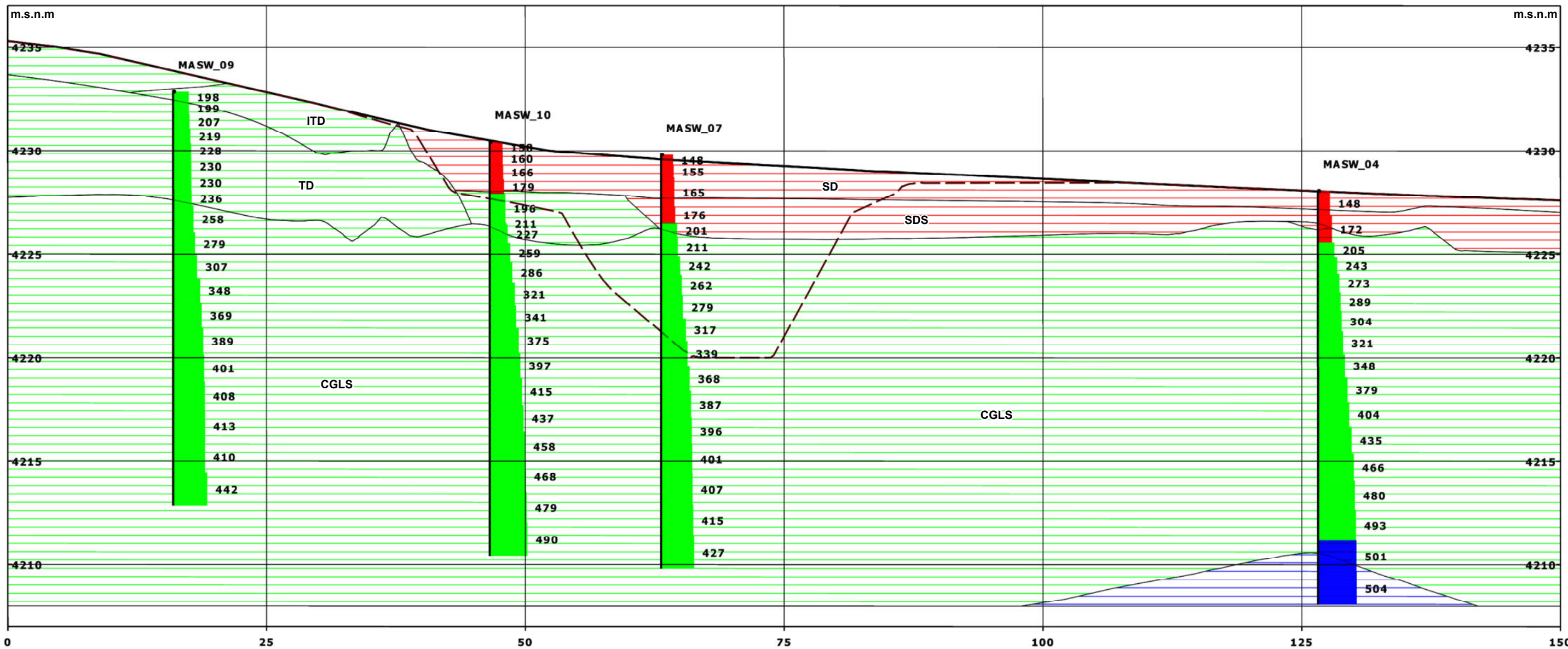
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

SECCIÓN AA': INTERPOLACIÓN DE Vp

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:400	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 04-A
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	

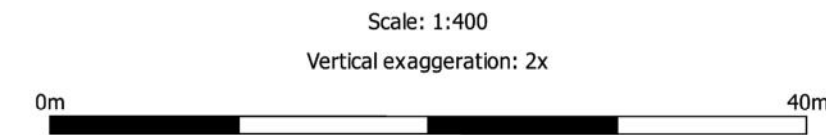
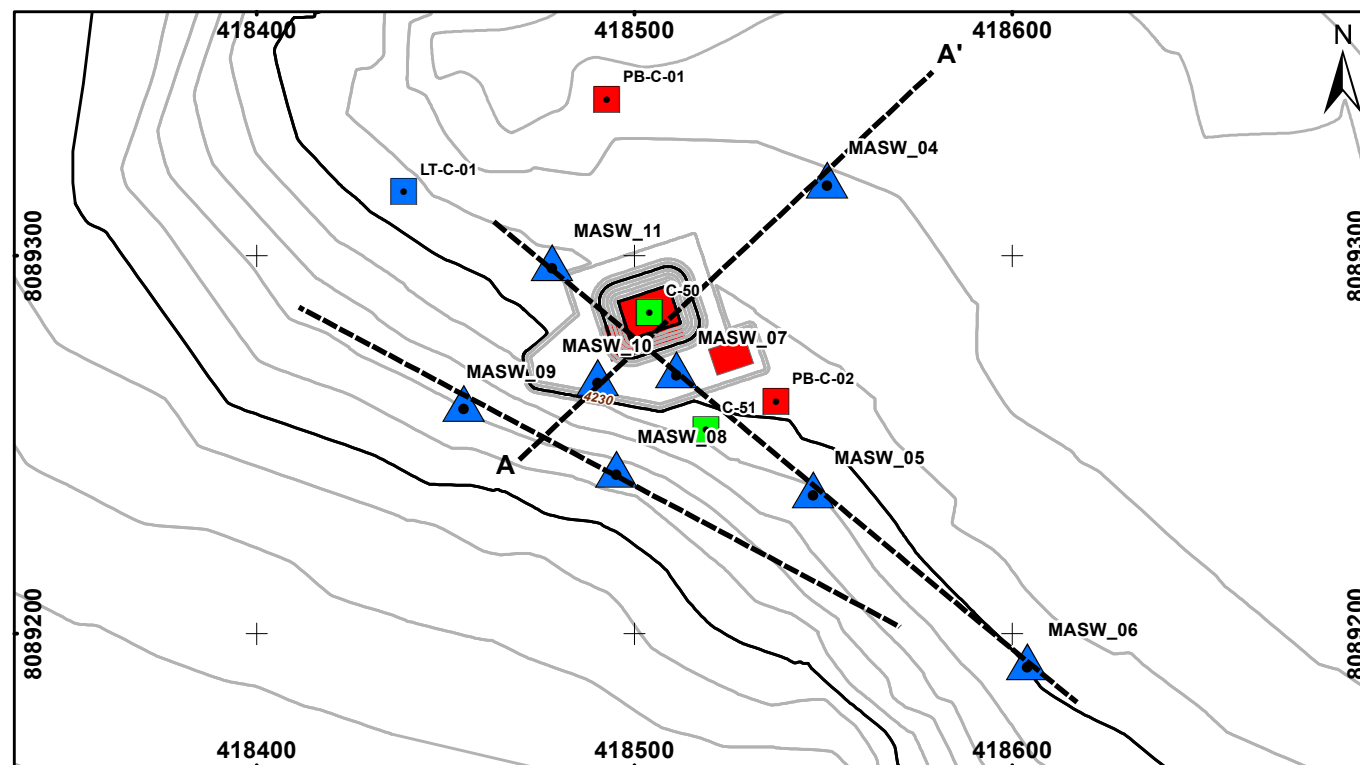
Sección AA': Interpolación Vs



Superficies
 — Topografía
 - - - Corte para movimiento de tierra

Vs_m/s
 ■ ≤ 180 : Suelo Blando
 ■ ≤ 500 : Suelo Medianamente Rígido
 ■ > 500 : Suelo Muy Rígido

Litología	Min_Vs m/s	Max_Vs m/s	Promedio m/s
SD	148	179	160
ITD	215	216	215
SDS	163	202	180
TD	225	237	232
CGLS	200	520	389



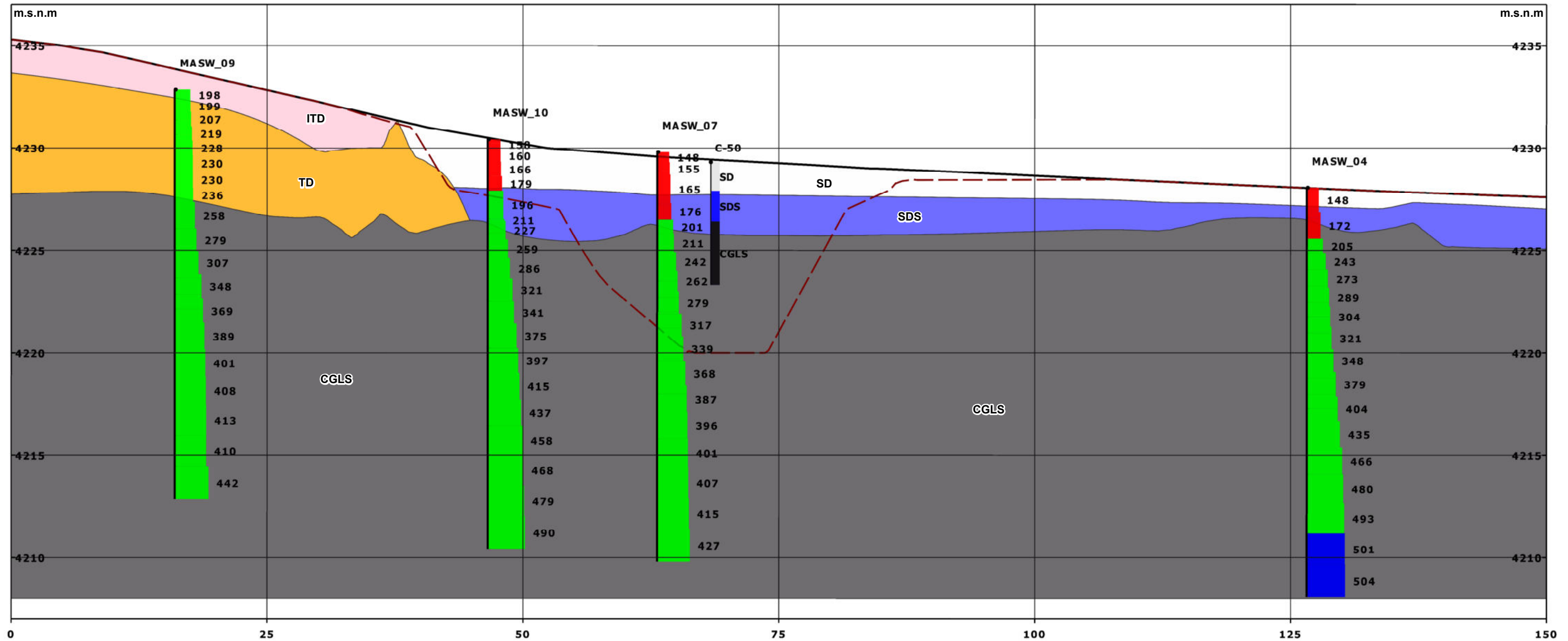
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

SECCIÓN AA': INTERPOLACIÓN DE Vs

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:400	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 04-B
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	

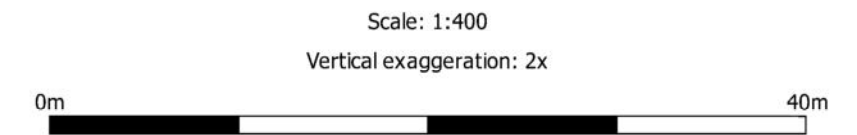
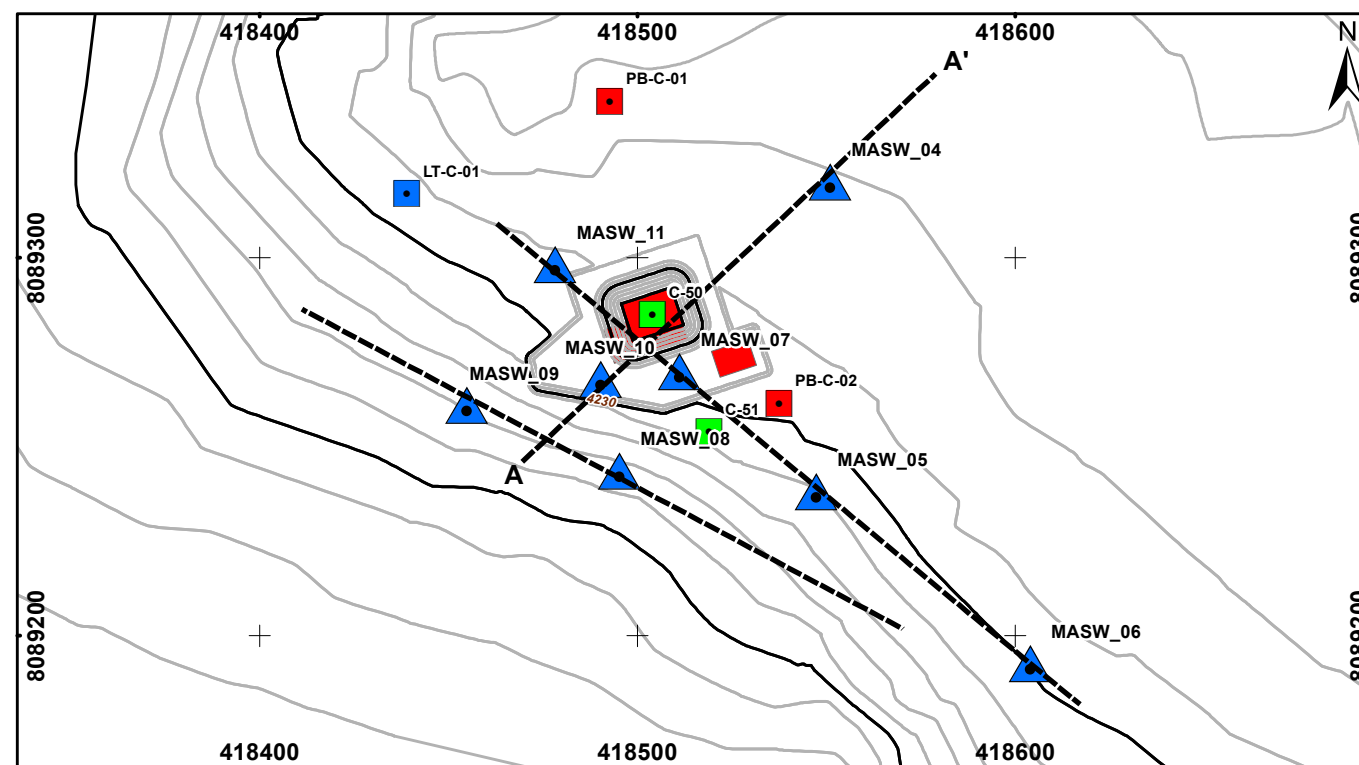
Sección AA': Interpretación Geológica de la Prospección Sísmica



Superficies
 — Topografía
 - - - Corte para movimiento de tierra

Vs_m/s
 ■ ≤ 180 : Suelo Blando
 ■ ≤ 500 : Suelo Medianamente Rígido
 ■ > 500 : Suelo Muy Rígido

Litología
 ■ CGLS: Arena gravosa fluvio-glaciar
 ■ ITD: Toba intemperizada
 ■ SD: Arena aluvial
 ■ SDS: Arena aluvial saturada
 ■ TD: Toba dacítica



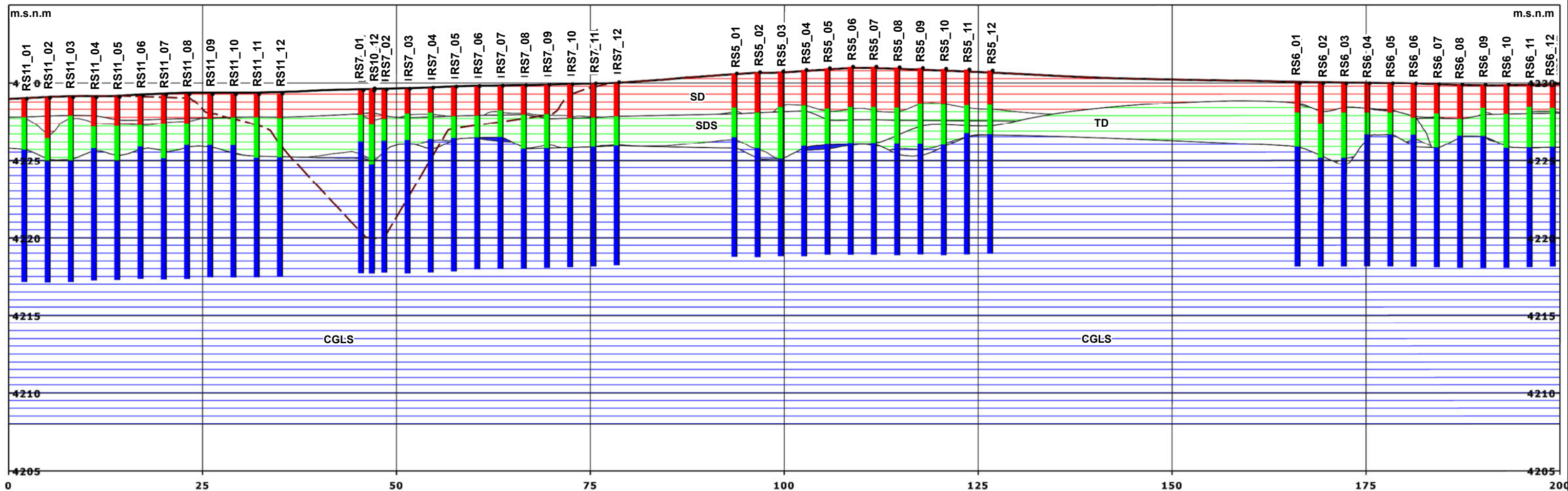
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

SECCIÓN AA': INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LA PROSPECCIÓN SÍSMICA

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:400	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 04-C
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	

Sección BB': Interpolación Vp



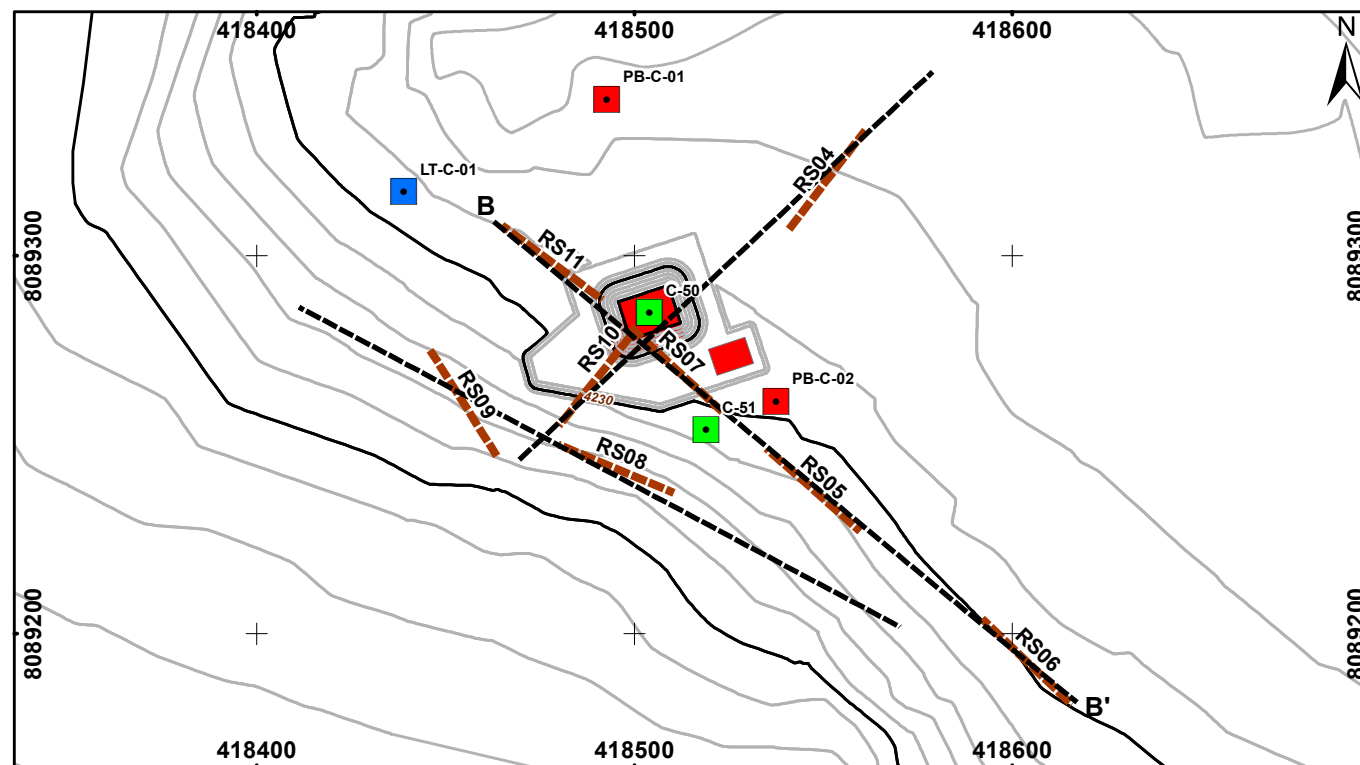
Superficies
 — Topografía
 - - - Corte para movimiento de tierra

Vp_m/s
 ■ ≤ 650 : 1era Capa
 ■ ≤ 1250 : 2da Capa
 ■ > 1250 : 3ra Capa

Scale: 1:500
 Vertical exaggeration: 2x



Litología	Min_Vp m/s	Max_Vp m/s	Promedio m/s
SD	216	700	483
ITD	312	414	374
SDS	550	1310	964
TD	520	1300	961
CGLS	1350	1670	1636



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

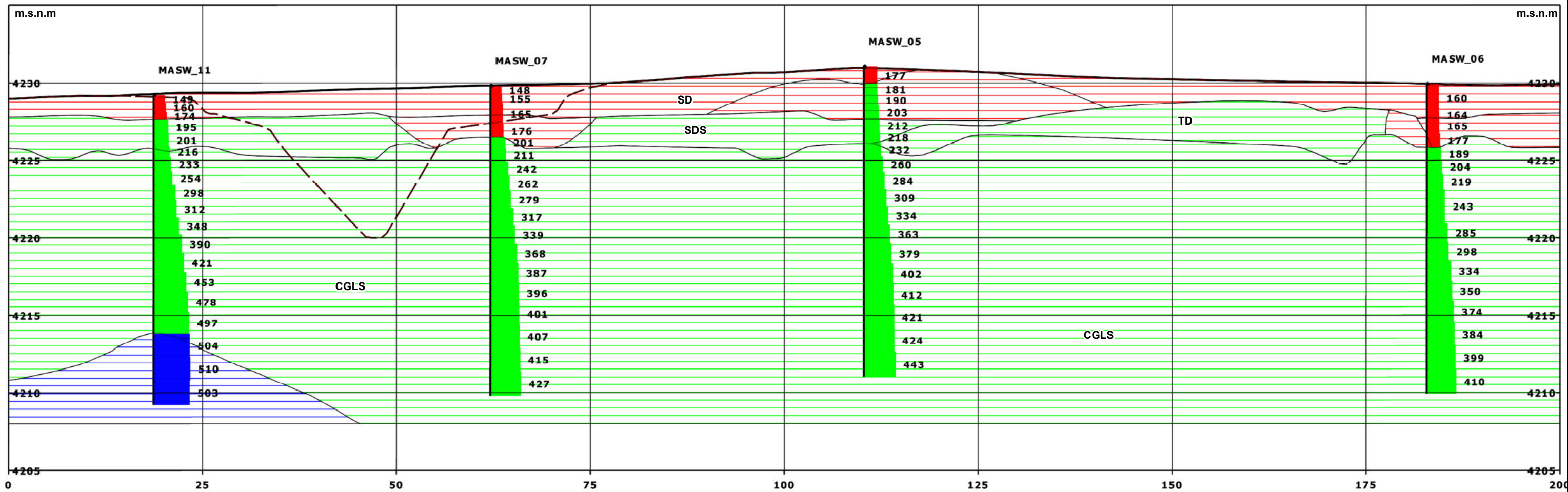
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

SECCIÓN BB': INTERPOLACIÓN DE Vp

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:500	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 04-D
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	

Sección BB': Interpolación Vs



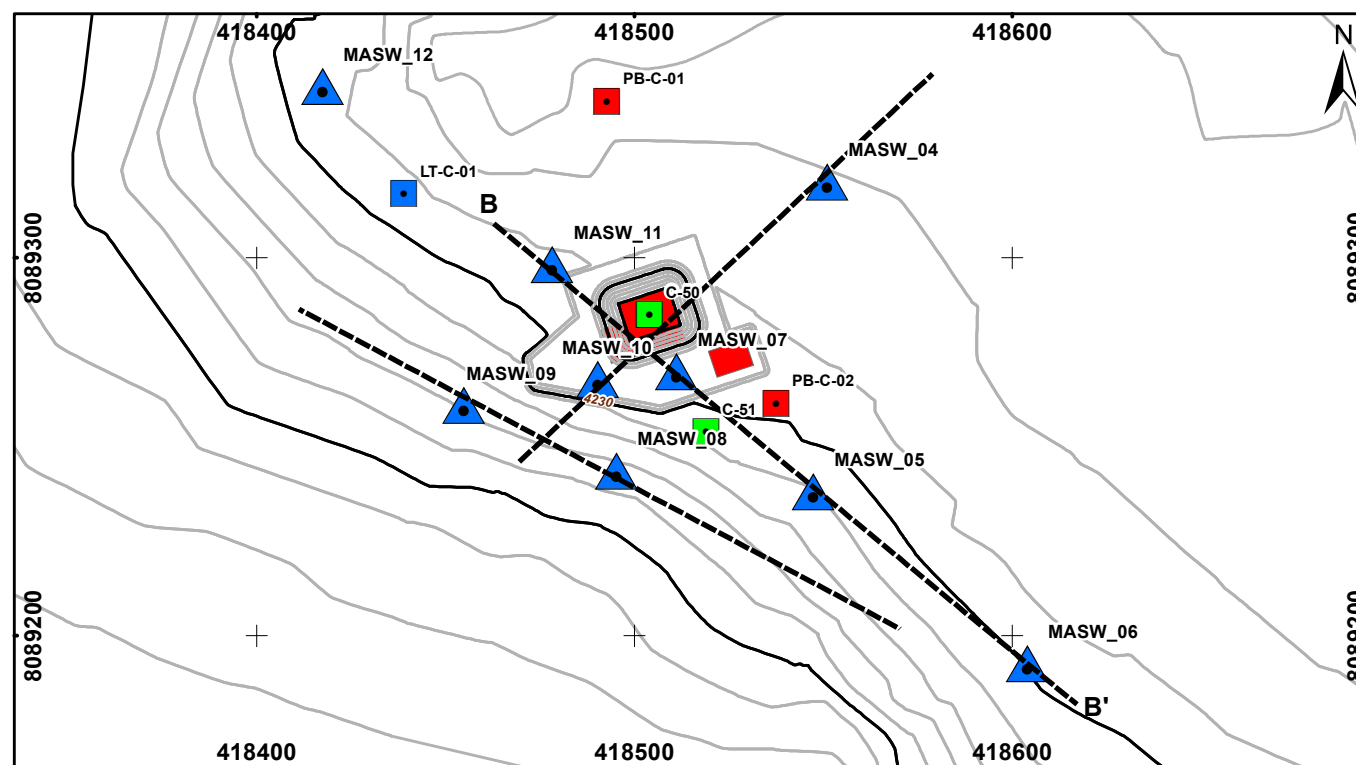
Superficies
 — Topografía
 - - Corte para movimiento de tierra

Vs_m/s
 ■ ≤ 180 : Suelo Blando
 ■ ≤ 500 : Suelo Medianamente Rígido
 ■ > 500 : Suelo Muy Rígido

Litología	Min_Vs m/s	Max_Vs m/s	Promedio m/s
SD	148	179	160
ITD	215	216	215
SDS	163	202	180
TD	225	237	232
CGLS	200	520	389

Scale: 1:500

Vertical exaggeration: 2x



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

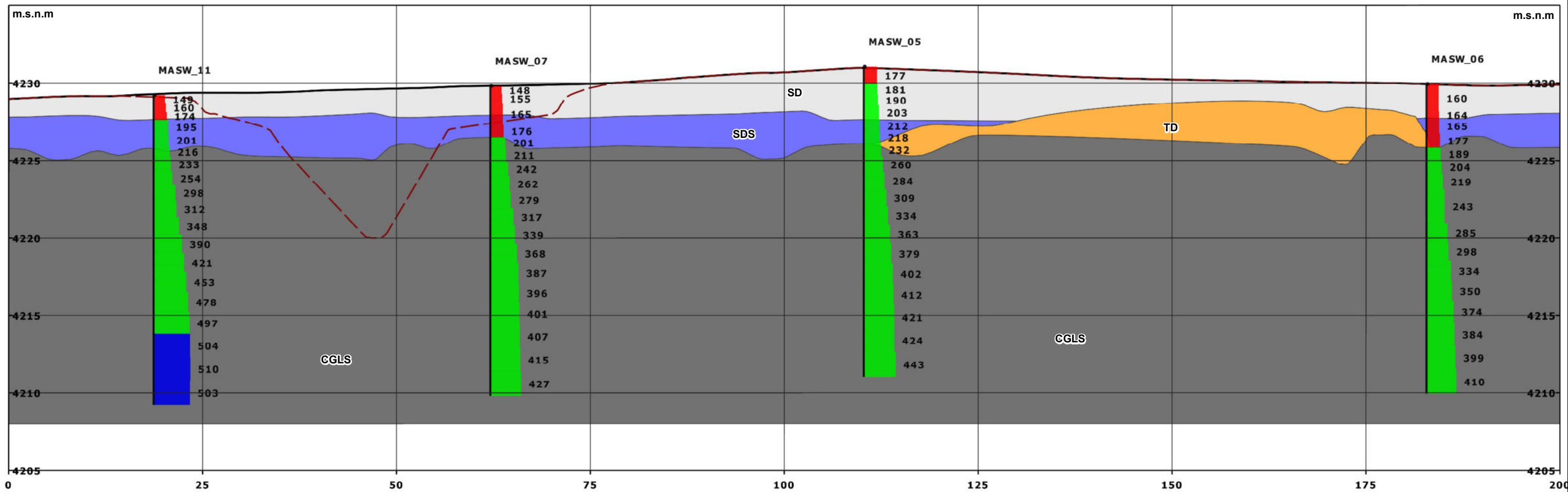
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

SECCIÓN BB': INTERPOLACIÓN DE Vs

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:500	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 04-E
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	

Sección BB': Interpretación Geológica de la Prospección Sísmica



Superficies

- Topografía
- Corte para movimiento de tierra

Vs_m/s

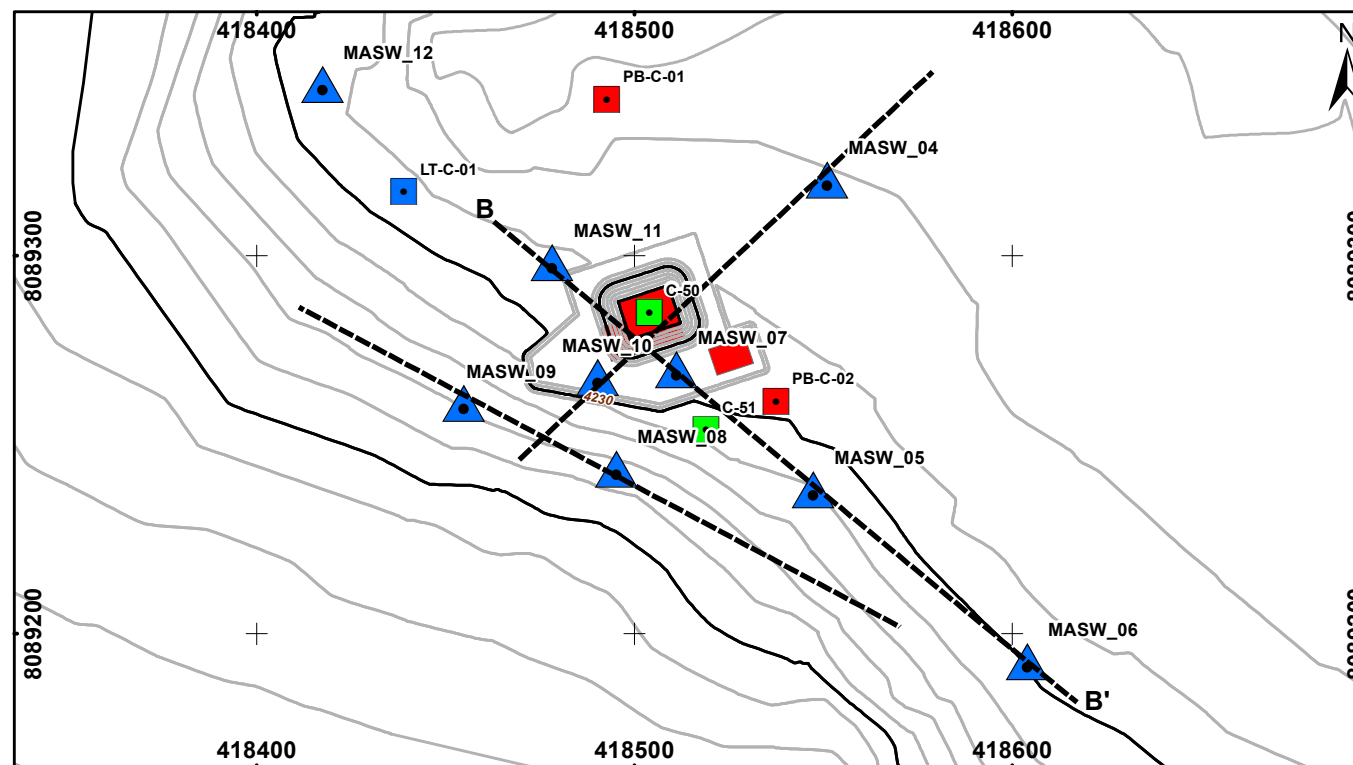
- ≤ 180 : Suelo Blando
- ≤ 500 : Suelo Medianamente Rígido
- > 500 : Suelo Muy Rígido

Litología

- CGLS: Arena gravosa fluvio-glaciaria
- SD: Arena aluvial
- SDS: Arena aluvial saturada
- TD: Toba dacítica

Scale: 1:500

Vertical exaggeration: 2x



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

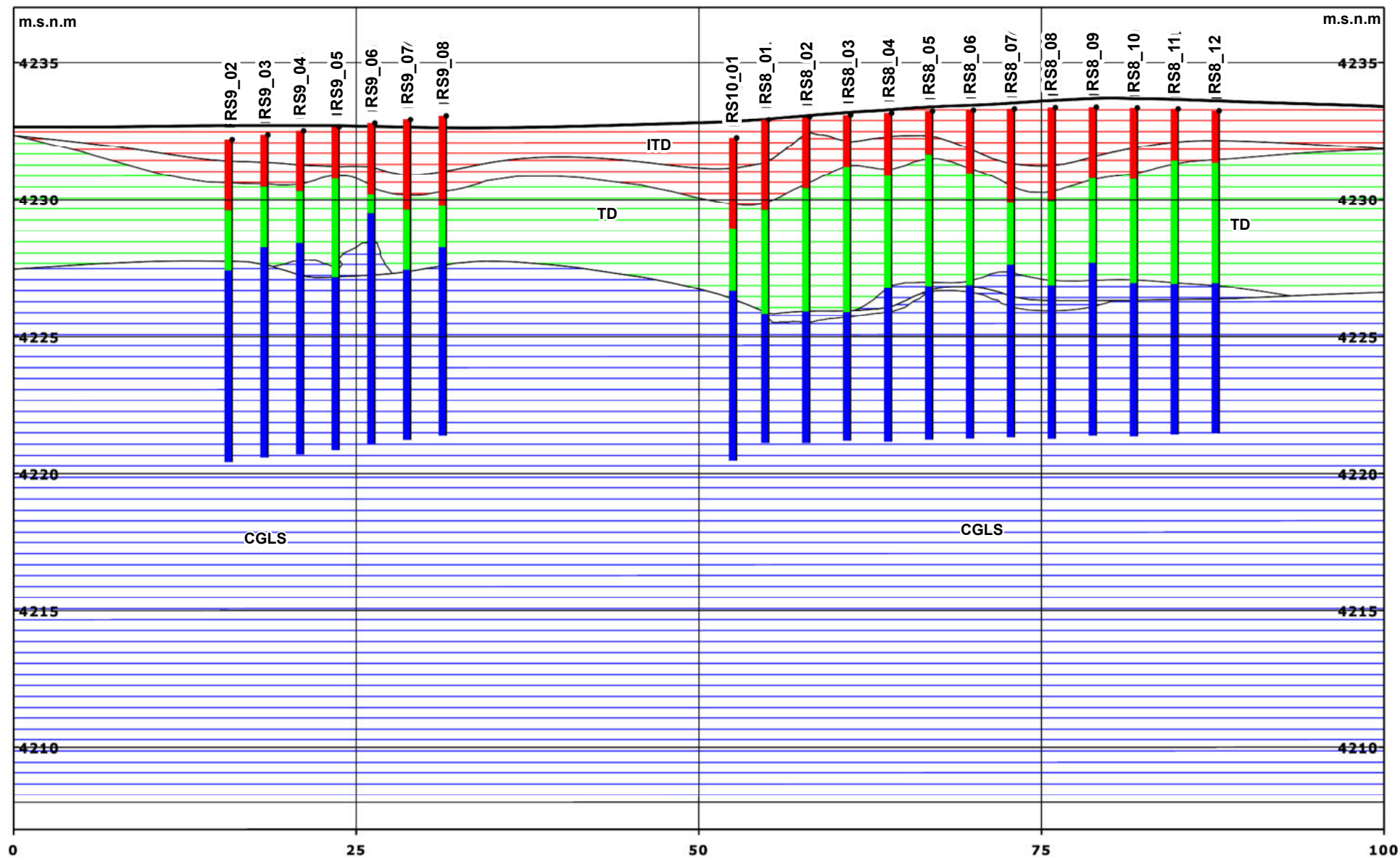
SECCIÓN BB': INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LA PROSPECCIÓN SÍSMICA

DATUM:	ESCALA:	FECHA:	PLANO N°:
WGS84_ZONA 19S	1:500	Ago. 2021	ANEXO 04-F
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	

NO

Sección CC': Interpolación Vp

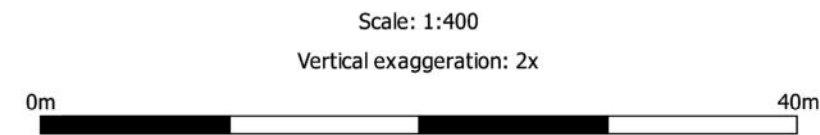
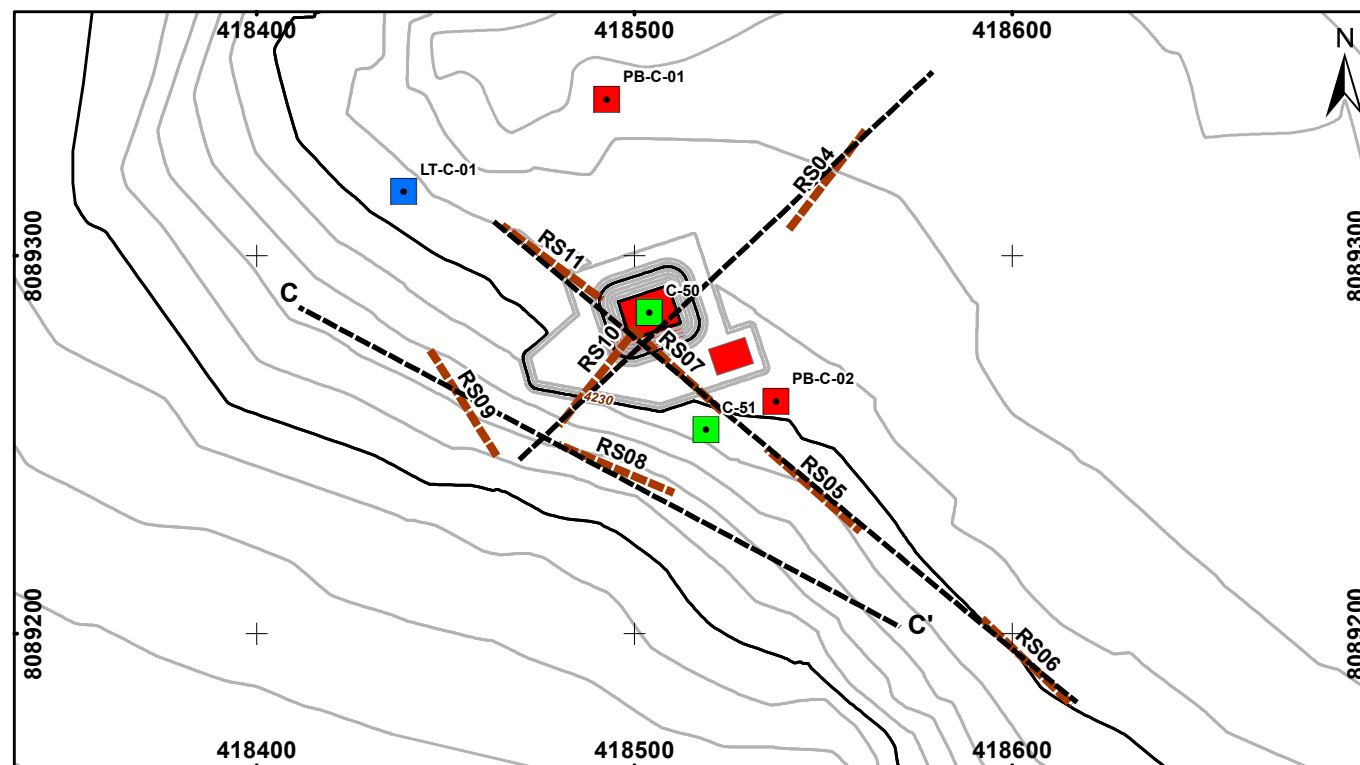
SE



Superficies
 Topografía

Vp_m/s
 ≤ 650 : 1era Capa
 ≤ 1250 : 2da Capa
 > 1250 : 3ra Capa

Litología	Min_Vp m/s	Max_Vp m/s	Promedio m/s
SD	216	700	483
ITD	312	414	374
SDS	550	1310	964
TD	520	1300	961
CGLS	1350	1670	1636



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

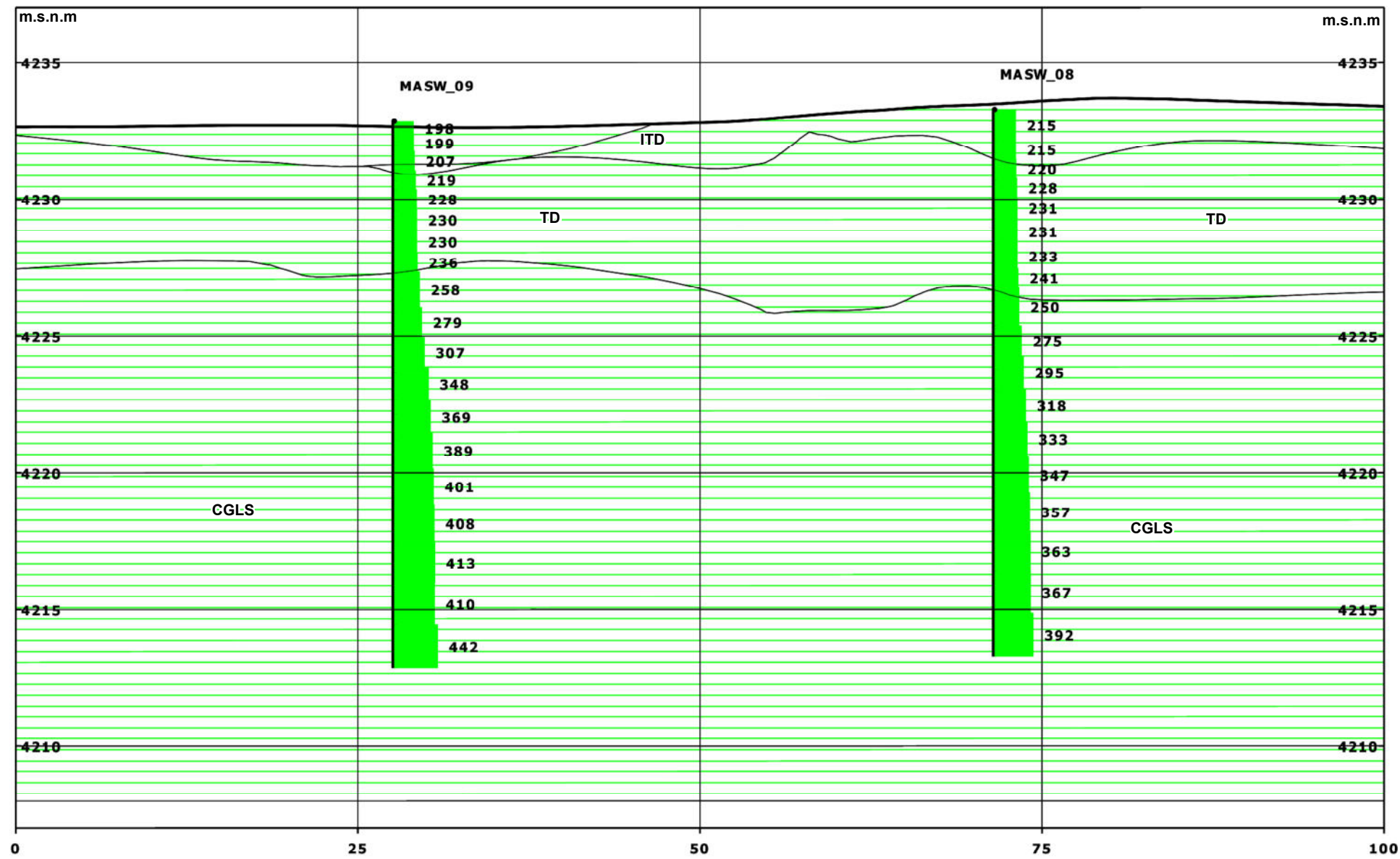
SECCIÓN CC': INTERPOLACIÓN DE Vp

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:400	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 04-G
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	

NO

Sección CC': Interpolación Vs

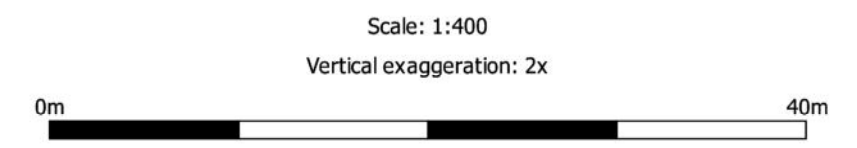
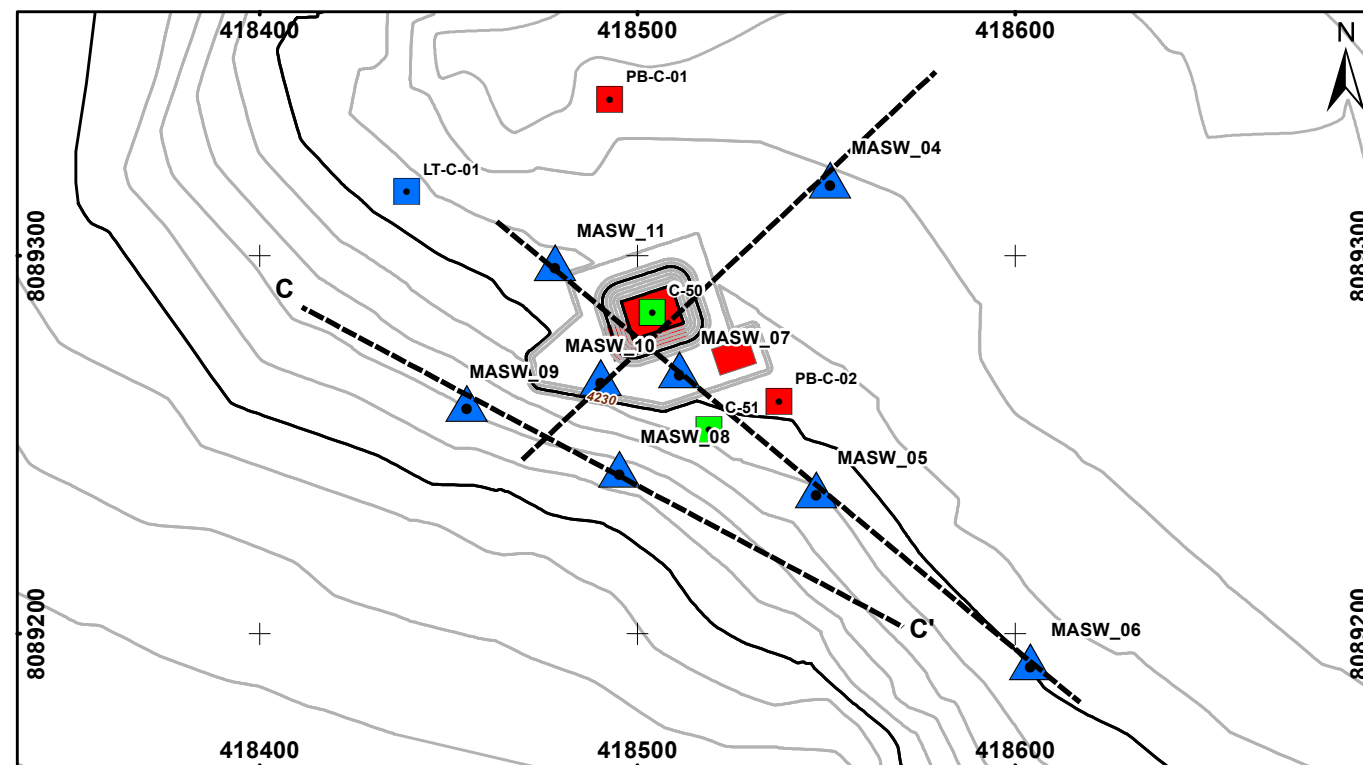
SE



Superficies
 — Topografía

Vs_m/s
 ■ ≤ 180 : Suelo Blando
 ■ ≤ 500 : Suelo Medianamente Rígido
 ■ > 500 : Suelo Muy Rígido

Litología	Min_Vs m/s	Max_Vs m/s	Promedio m/s
SD	148	179	160
ITD	215	216	215
SDS	163	202	180
TD	225	237	232
CGLS	200	520	389



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

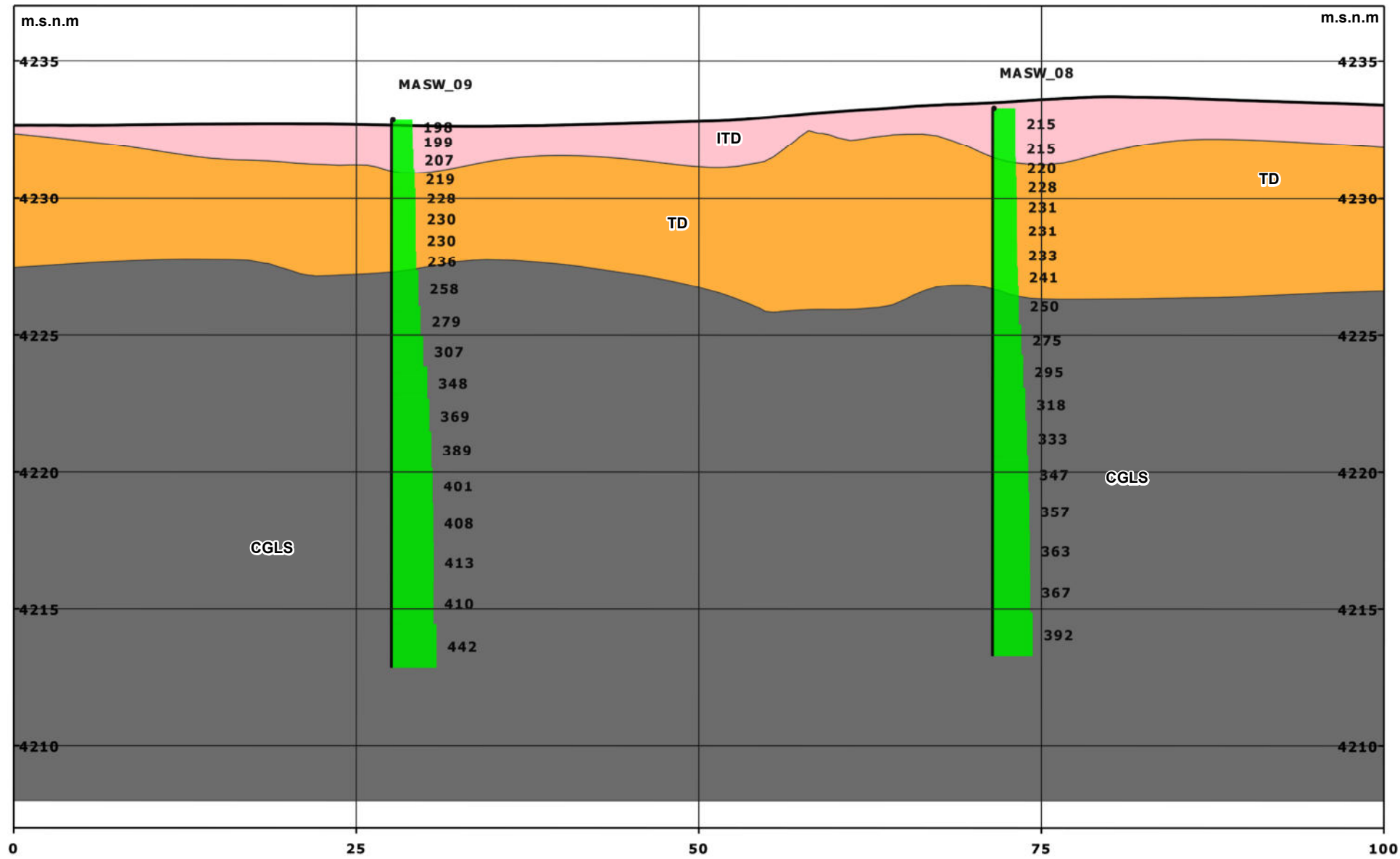
SECCIÓN CC': INTERPOLACIÓN DE Vs

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:400	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 04-H
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUÉ	

NO

Sección CC': Interpretación Geológica de la Prospección Sísmica

SE



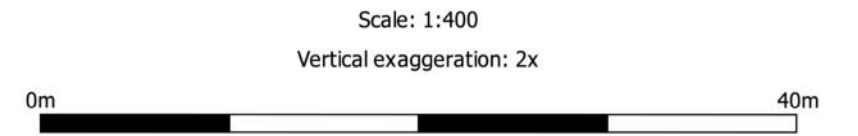
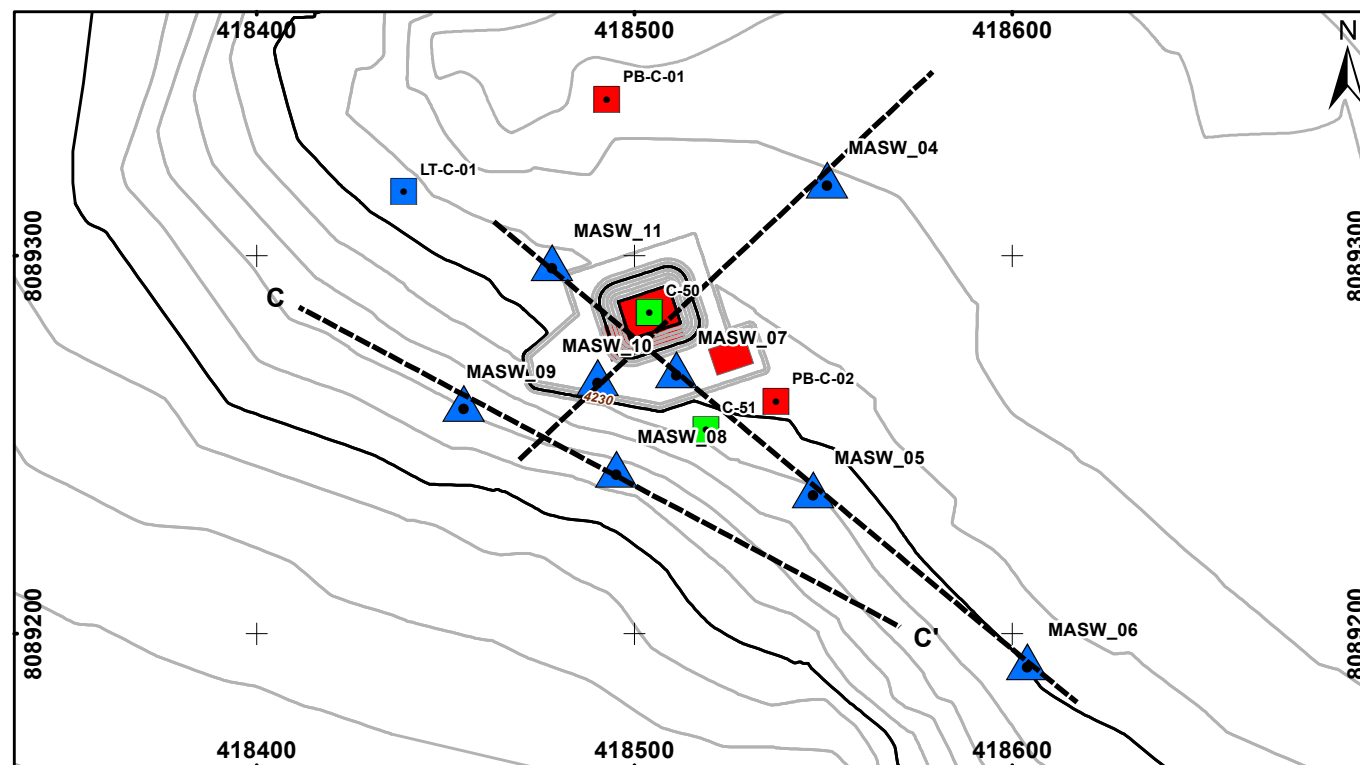
Superficies
— Topografía

Vs_m/s

- ≤ 180 : Suelo Blando
- ≤ 500 : Suelo Medianamente Rígido
- > 500 : Suelo Muy Rígido

Litología

- CGLS: Arena gravosa fluvio-glacial
- ITD: Toba interperizada
- TD: Toba dacítica



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

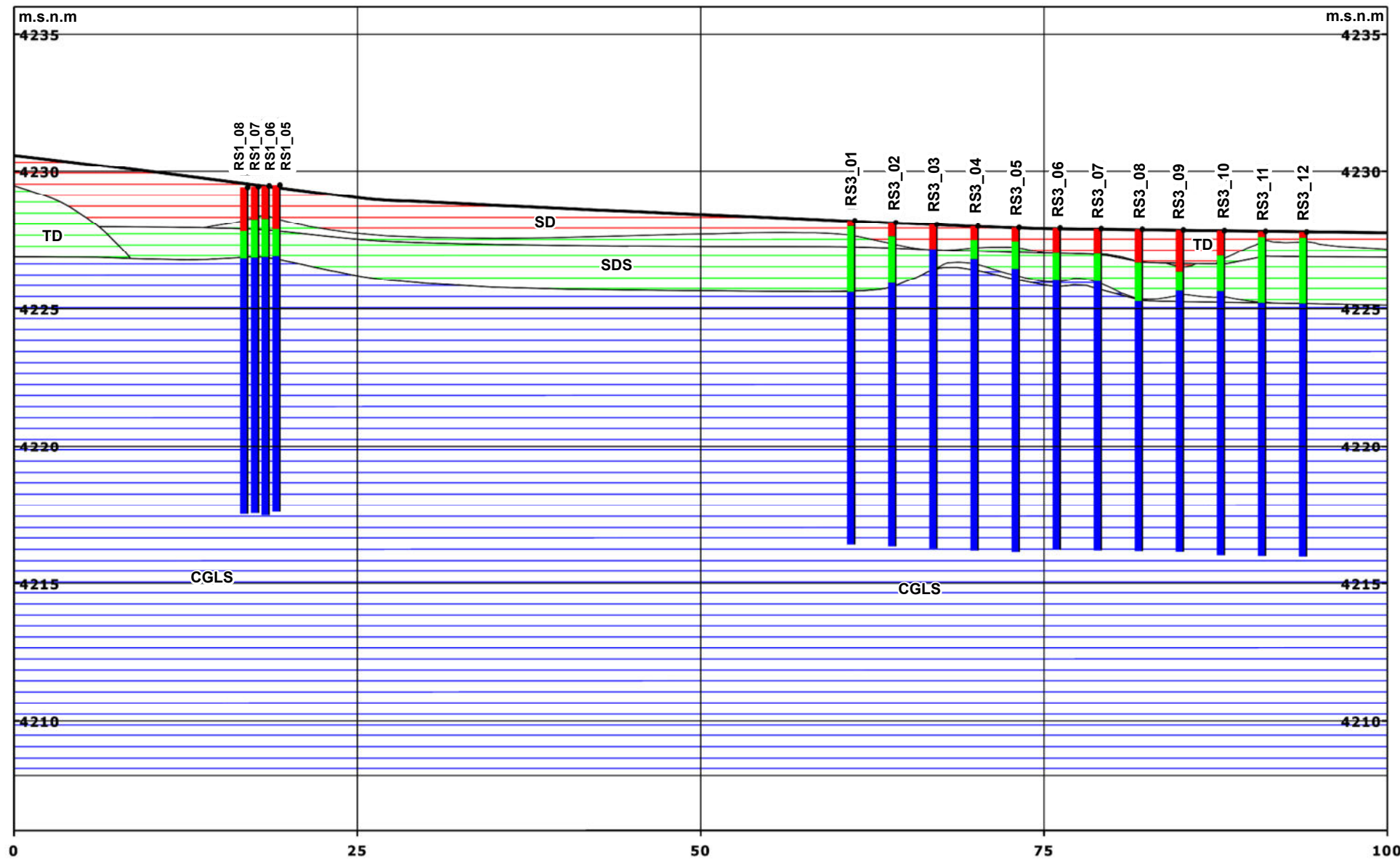
SECCIÓN CC': INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LA PROSPECCIÓN SÍSMICA

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:400	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 04-I
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	

SO

Sección DD': Interpolación Vp

NE



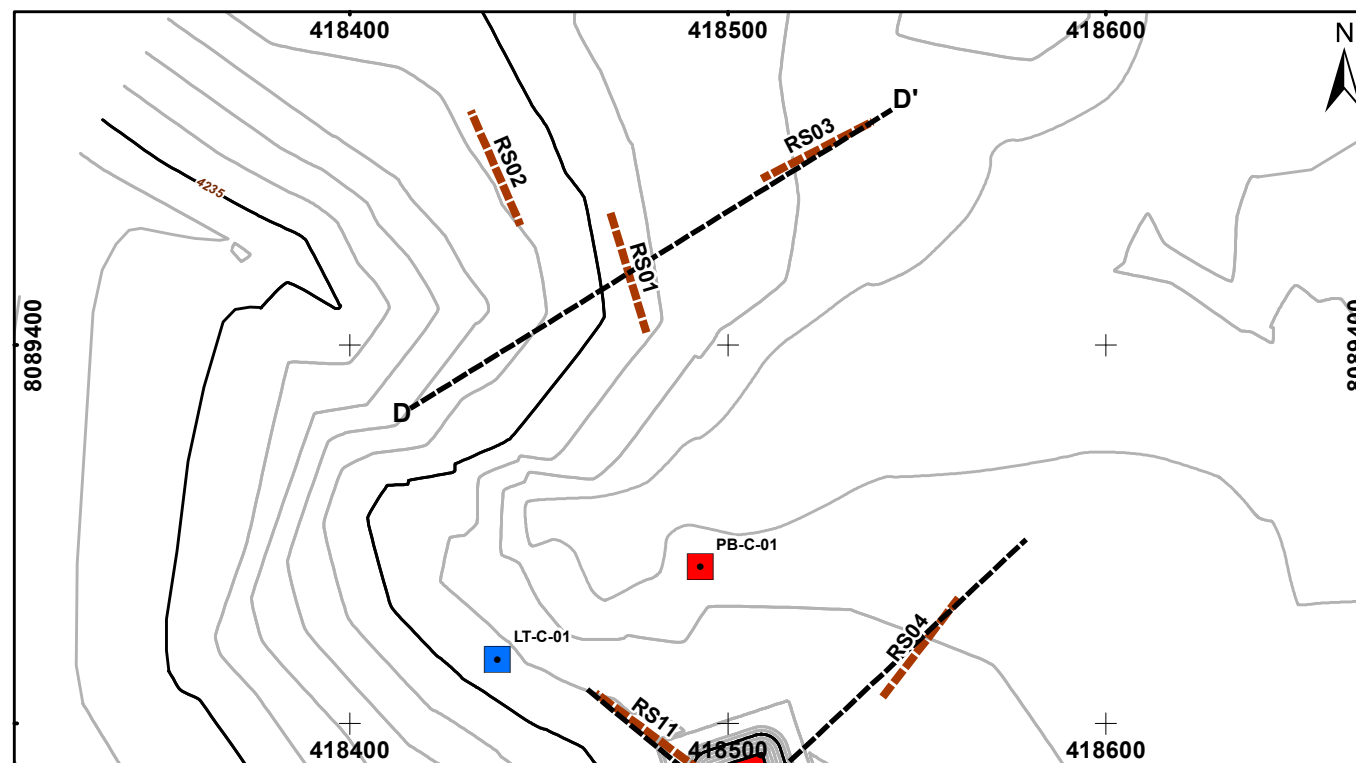
Superficies

— Topografía

Vp_m/s

- ≤ 650 : 1era Capa
- ≤ 1250 : 2da Capa
- > 1250 : 3ra Capa

Litología	Min_Vp m/s	Max_Vp m/s	Promedio m/s
SD	216	700	483
ITD	312	414	374
SDS	550	1310	964
TD	520	1300	961
CGLS	1350	1670	1636



Scale: 1:400

Vertical exaggeration: 2x



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN



FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

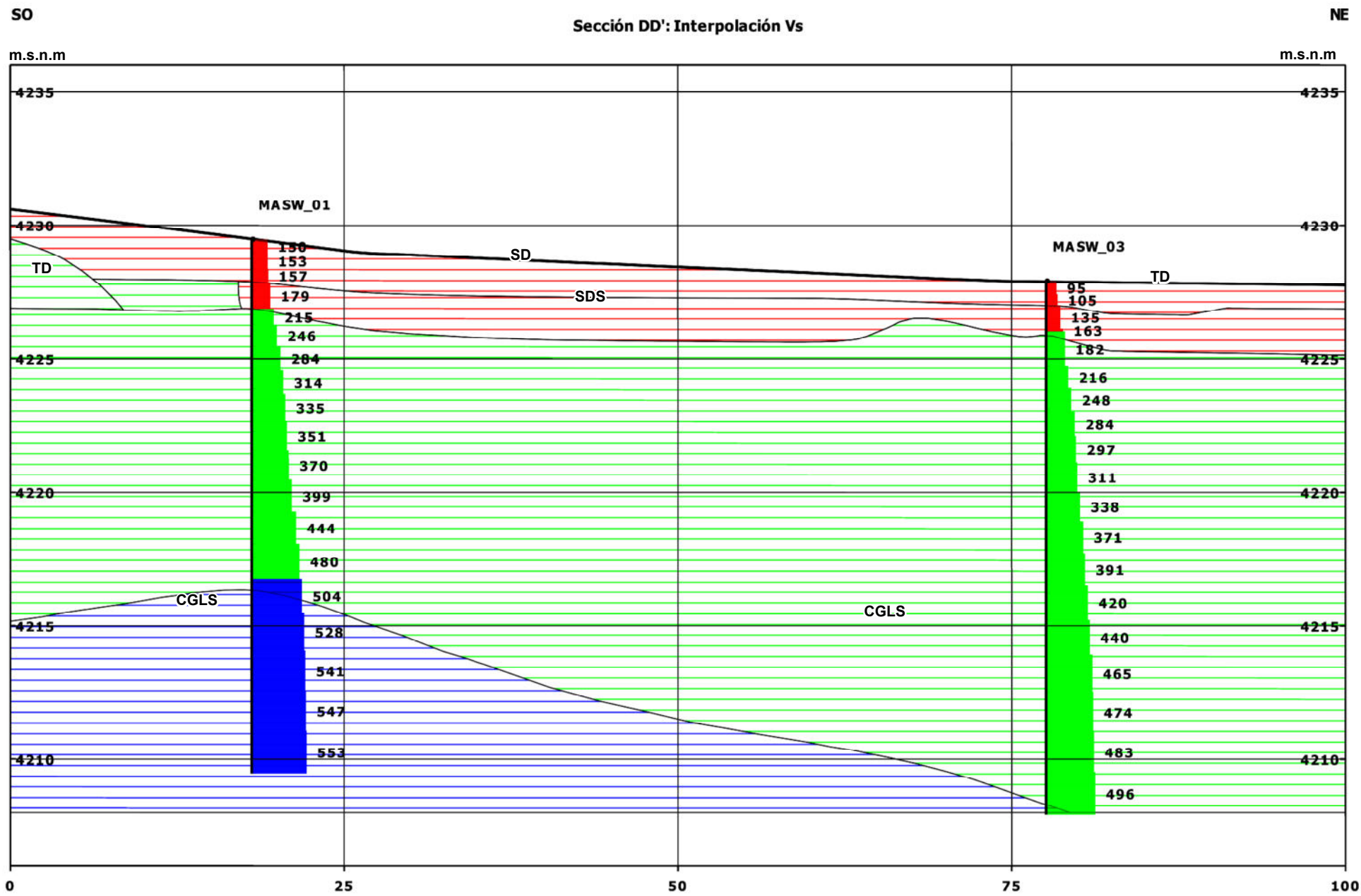


ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

SECCIÓN DD': INTERPOLACIÓN DE Vp

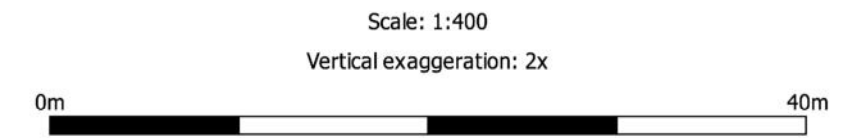
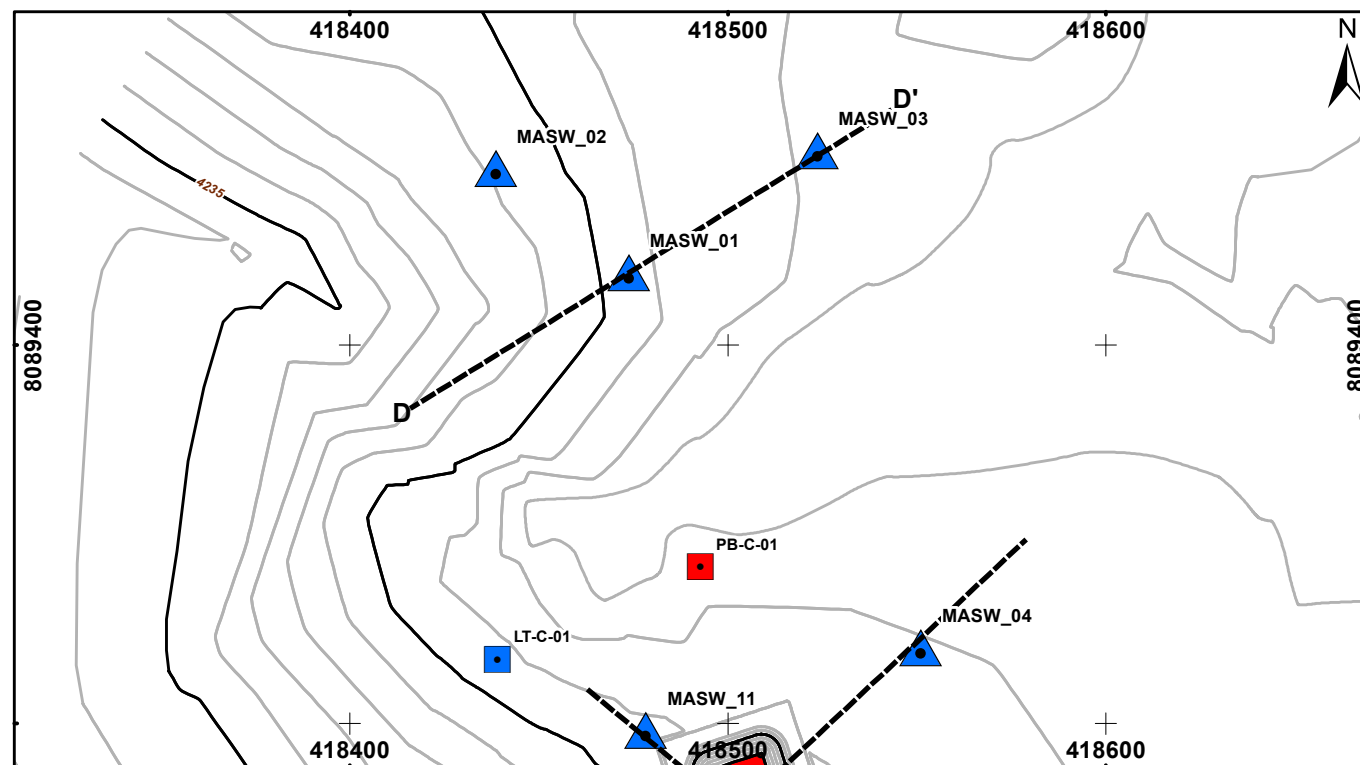
DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:400	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 04-J
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	



Superficies
 — Topografía

Vs_m/s
 ■ ≤ 180 : Suelo Blando
 ■ ≤ 500 : Suelo Medianamente Rígido
 ■ > 500 : Suelo Muy Rígido

Litología	Min_Vs m/s	Max_Vs m/s	Promedio m/s
SD	148	179	160
ITD	215	216	215
SDS	163	202	180
TD	225	237	232
CGLS	200	520	389



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

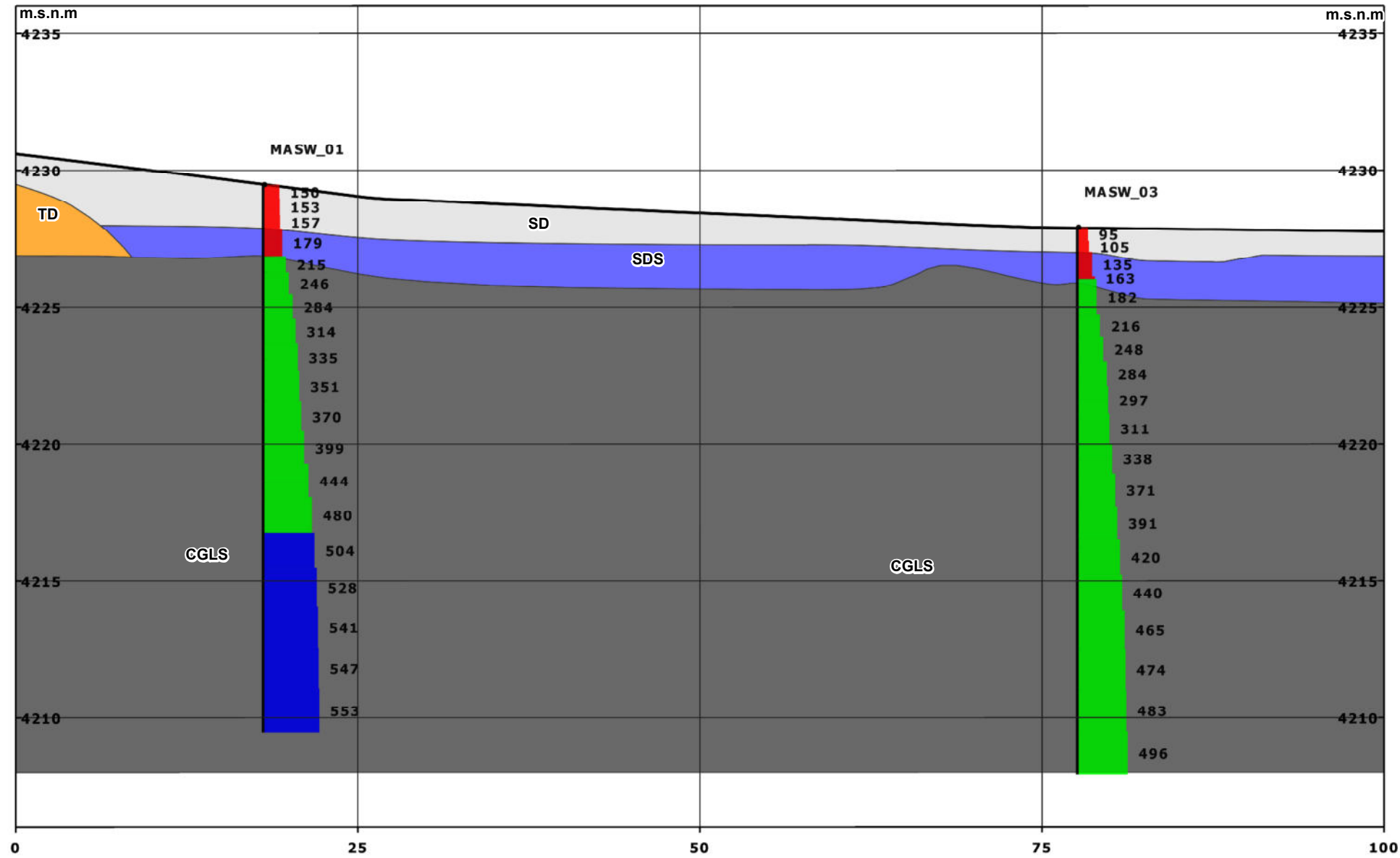
SECCIÓN DD': INTERPOLACIÓN DE Vs

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:400	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 04-K
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	

SO

Sección DD': Interpretación Geológica de la Prospección Sísmica

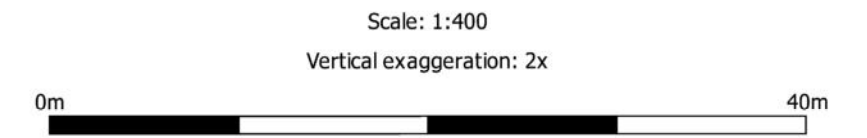
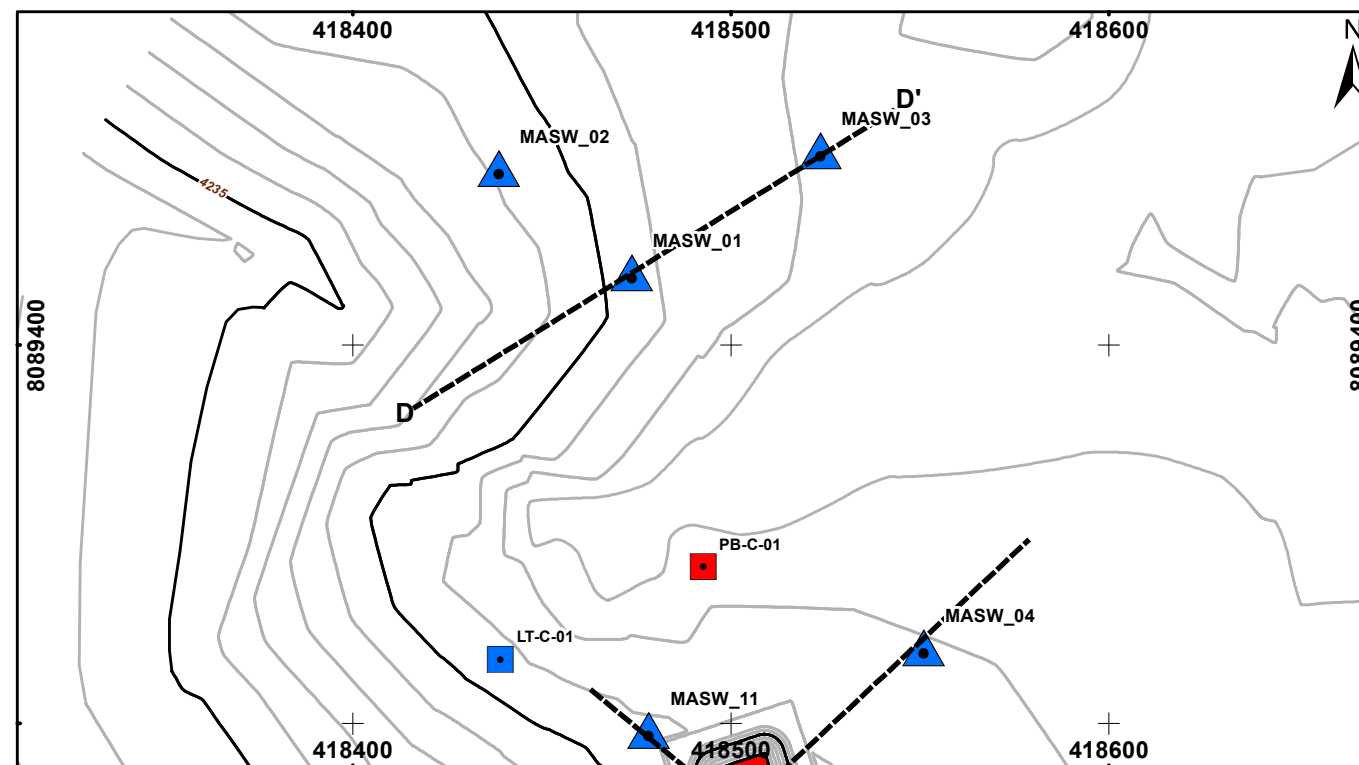
NE



Superficies
— Topografía

- Vs_m/s**
- ≤ 180 : Suelo Blando
 - ≤ 500 : Suelo Medianamente Rígido
 - > 500 : Suelo Muy Rígido

- Litología**
- CGLS: Arena gravosa fluvio-glacial
 - SD: Arena aluvial
 - SDS: Arena aluvial saturada
 - TD: Toba dacítica



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS - CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES APLICADOS EN EL PROYECTO PLANTA DE BOMBEO OJO COPAPUJO

SECCIÓN DD': INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LA PROSPECCIÓN SÍSMICA

DATUM: WGS84_ZONA 19S	ESCALA: 1:400	FECHA: Ago. 2021	PLANO N°: ANEXO 04-L
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR		AUTOR: M. CHIQUE	

ANEXO 5

CÁLCULO DE PARÁMETROS ELÁSTICO DINÁMICOS, DENSIDAD RELATIVA Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EMPÍRICA

1. Resumen de resultados de densidad por estrato y cota de elevación.

Estrato	Cota	Min Densidad g/cm³	Max Densidad g/cm³	Media Densidad g/cm³	DevStd Densidad g/cm³	Cv
SD	4231	1,786	1,818	1,798	0,006	0,4%
	4230	1,777	1,846	1,810	0,013	0,7%
	4229	1,783	1,876	1,836	0,015	0,8%
	4228	1,821	1,874	1,853	0,011	0,6%
SDS	4228	1,845	1,943	1,902	0,017	0,9%
	4227	1,887	1,995	1,938	0,017	0,9%
	4226	1,931	2,000	1,963	0,011	0,6%
CGLS	4227	2,008	2,057	2,026	0,010	0,5%
	4226	2,008	2,067	2,033	0,009	0,4%
	4225	2,008	2,069	2,043	0,010	0,5%
	4224	2,029	2,073	2,053	0,009	0,4%
	4223	2,043	2,073	2,060	0,007	0,4%
	4222	2,049	2,073	2,064	0,006	0,3%
	4221	2,055	2,073	2,066	0,004	0,2%
	4220	2,06	2,073	2,068	0,003	0,2%
	4219	2,064	2,073	2,070	0,003	0,1%
	4218	2,067	2,073	2,071	0,002	0,1%
	4217	2,068	2,073	2,072	0,001	0,1%
	4216	2,07	2,073	2,073	0,001	0,0%
	4215	2,072	2,073	2,073	0,000	0,0%
	4214	2,073	2,073	2,073	0,000	0,0%
	4213	2,073	2,073	2,073	0,000	0,0%
	4212	2,073	2,073	2,073	0,000	0,0%
4211	2,073	2,073	2,073	0,000	0,0%	
4210	2,073	2,073	2,073	0,000	0,0%	
4209	2,073	2,073	2,073	0,000	0,0%	

2. Resumen de resultados del coeficiente de Poisson por estrato y cota de elevación.

Estrato	Cota	Min Poisson (v)	Max Poisson (v)	Average Poisson (v)	DevStd Poisson (v)	Cv
SD	4231	0,405	0,322	0,044	13,6%	0,405
	4230	0,449	0,375	0,059	15,8%	0,449
	4229	0,467	0,438	0,028	6,3%	0,467
	4228	0,473	0,459	0,011	2,4%	0,473
SDS	4228	0,486	0,474	0,008	1,8%	0,486
	4227	0,490	0,483	0,004	0,8%	0,490
	4226	0,490	0,486	0,002	0,4%	0,490
CGLS	4227	0,490	0,488	0,001	0,3%	0,490
	4226	0,491	0,487	0,002	0,3%	0,491
	4225	0,491	0,486	0,002	0,3%	0,491
	4224	0,488	0,484	0,002	0,3%	0,488
	4223	0,486	0,482	0,002	0,4%	0,486
	4222	0,485	0,480	0,002	0,5%	0,485
	4221	0,482	0,477	0,003	0,6%	0,482
	4220	0,480	0,475	0,003	0,7%	0,480
	4219	0,478	0,472	0,004	0,8%	0,478
	4218	0,476	0,469	0,004	0,9%	0,476
	4217	0,474	0,467	0,005	1,0%	0,474
	4216	0,472	0,465	0,005	1,0%	0,472
	4215	0,471	0,463	0,005	1,1%	0,471
	4214	0,469	0,461	0,005	1,1%	0,469
	4213	0,468	0,459	0,005	1,1%	0,468
4212	0,467	0,457	0,005	1,1%	0,467	
4211	0,466	0,456	0,005	1,0%	0,466	
4210	0,463	0,454	0,004	1,0%	0,463	
4209	0,461	0,452	0,004	0,9%	0,461	

3. Resumen de resultados del módulo de elasticidad por estrato y cota de elevación.

Estrato	Cota	Min E MPa	Max E MPa	Media E MPa	DevStd E MPa	Cv
SD	4231	28,072	24,641	1,307	5,3%	28,072
	4230	30,810	25,370	1,994	7,9%	30,810
	4229	34,696	27,200	1,924	7,1%	34,696
	4228	31,419	27,599	1,305	4,7%	31,419
SDS	4228	45,539	36,413	3,944	10,8%	45,539
	4227	46,814	37,351	4,202	11,3%	46,814
	4226	48,289	39,054	4,023	10,3%	48,289
CGLS	4227	75,244	56,528	8,188	14,5%	75,244
	4226	89,946	65,486	6,816	10,4%	89,946
	4225	106,142	76,898	8,074	10,5%	106,142
	4224	125,802	91,511	10,057	11,0%	125,802
	4223	143,709	107,360	11,970	11,1%	143,709
	4222	168,051	124,163	13,869	11,2%	168,051
	4221	189,078	141,894	16,064	11,3%	189,078
	4220	200,879	159,591	18,131	11,4%	200,879
	4219	221,617	176,803	20,160	11,4%	221,617
	4218	247,862	193,114	22,426	11,6%	247,862
	4217	268,738	208,115	24,571	11,8%	268,738
	4216	287,575	221,718	26,454	11,9%	287,575
	4215	299,55	233,819	27,636	11,8%	299,550
	4214	305,666	244,663	28,024	11,5%	305,666
	4213	309,929	254,637	27,761	10,9%	309,929
	4212	311,296	264,024	26,864	10,2%	311,296
4211	313,811	273,068	25,395	9,3%	313,811	
4210	318,963	282,170	23,744	8,4%	318,963	
4209	324,728	291,445	22,218	7,6%	324,728	

4. Resumen de resultados del módulo de corte por estrato y cota de elevación.

Estrato	Cota	Min G MPa	Max G MPa	Media G MPa	DevStd G MPa	Cv
SD	4231	8,791	9,988	9,317	0,238	2,5%
	4230	7,901	10,641	9,220	0,488	5,3%
	4229	8,179	11,857	9,456	0,615	6,5%
	4228	8,51	11,055	9,461	0,477	5,0%
SDS	4228	10,177	15,408	12,358	1,384	11,2%
	4227	10,294	15,815	12,595	1,437	11,4%
	4226	10,566	16,234	13,138	1,362	10,4%
CGLS	4227	15,697	25,32	18,991	2,766	14,6%
	4226	17,184	30,317	22,020	2,312	10,5%
	4225	19,877	35,784	25,879	2,741	10,6%
	4224	25,534	42,506	30,830	3,421	11,1%
	4223	30,215	48,658	36,218	4,084	11,3%
	4222	34,692	57,062	41,955	4,751	11,3%
	4221	39,355	64,365	48,035	5,529	11,5%
	4220	43,981	68,468	54,129	6,271	11,6%
	4219	48,6	75,714	60,079	7,007	11,7%
	4218	53,08	84,953	65,738	7,829	11,9%
	4217	57,337	92,319	70,960	8,607	12,1%
	4216	61,166	98,982	75,711	9,290	12,3%
	4215	64,375	103,223	79,954	9,726	12,2%
	4214	66,97	105,413	83,771	9,886	11,8%
	4213	69,234	106,943	87,290	9,814	11,2%
	4212	71,603	107,434	90,609	9,515	10,5%
4211	74,627	108,337	93,814	9,012	9,6%	
4210	78,689	110,19	97,047	8,446	8,7%	
4209	82,963	112,267	100,351	7,924	7,9%	

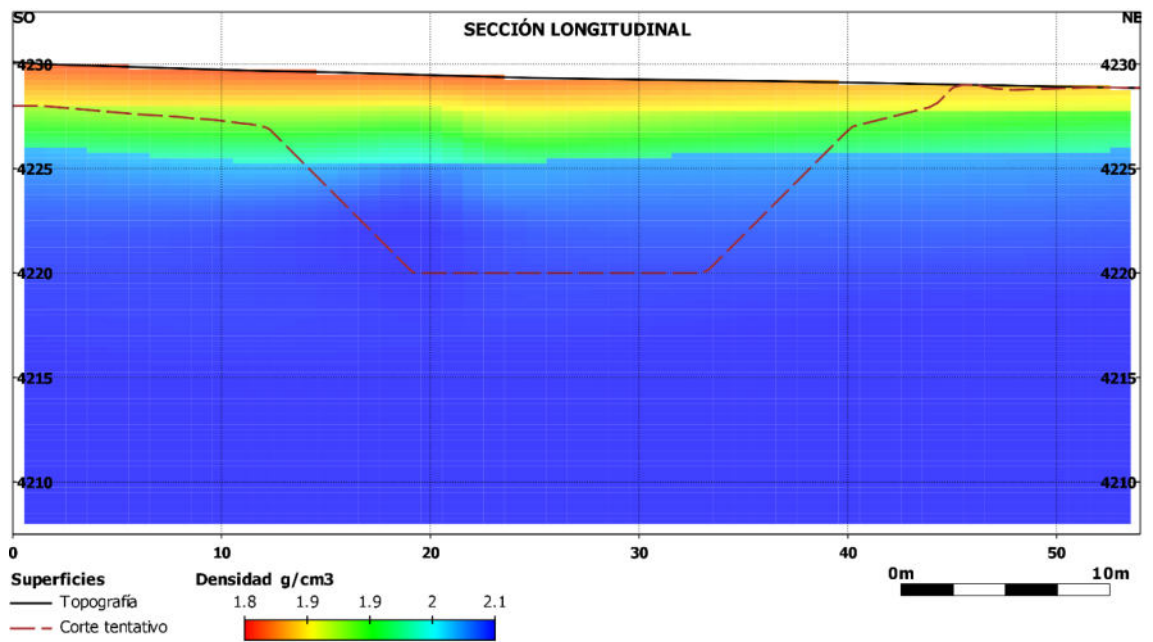
5. Resumen de resultados de la densidad relativa por estrato y cota de elevación.

Estrato	Cota	Min Dr_pct	Max Dr_pct	Media Dr_pct	DevStd Dr_pct	Cv
SD	4231	25,8	29,94	27,77	0,819	2,9%
	4230	22,5	31,89	27,19	1,726	6,3%
	4229	23,46	41,5	27,60	2,286	8,3%
	4228	23,89	33,9	27,27	1,826	6,7%
SDS	4228	28,63	47,1	38,60	6,050	15,7%
	4227	28,8	47,67	38,66	5,953	15,4%
	4226	29,22	47,85	40,55	5,299	13,1%
CGLS	4227	46,5	65,13	52,51	5,312	10,1%
	4226	48,87	70,86	58,26	4,489	7,7%
	4225	53,35	76,87	64,10	3,785	5,8%
	4224	64,98	87,75	70,34	4,649	6,6%
	4223	67,99	96,78	77,71	6,502	8,4%
	4222	74,85	100	86,58	6,884	8,0%
	4221	82,9	100	93,93	5,437	5,8%
	4220	89,74	100	98,27	2,749	2,8%
	4219	96,43	100	99,89	0,492	0,5%
	4218	100	100	100	0,000	0,0%
	4217	100	100	100	0,000	0,0%
	4216	100	100	100	0,000	0,0%
	4215	100	100	100	0,000	0,0%
	4214	100	100	100	0,000	0,0%
	4213	100	100	100	0,000	0,0%
4212	100	100	100	0,000	0,0%	
4211	100	100	100	0,000	0,0%	
4210	100	100	100	0,000	0,0%	
4209	100	100	100	0,000	0,0%	

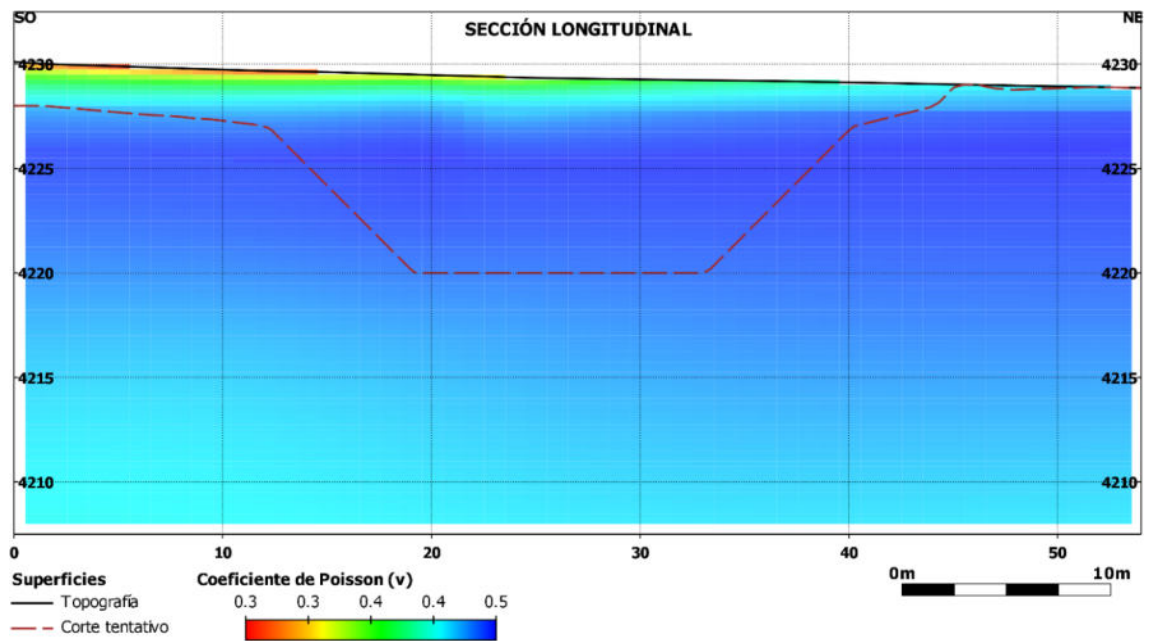
6. Resumen de resultados del ángulo de fricción por estrato y cota de elevación.

Estrato	Cota	Min ϕ(deg)	Max ϕ(deg)	Media ϕ(deg)	DevStd ϕ(deg)	Cv
SD	4231	31,61	32,19	31,89	0,115	0,4%
	4230	31,15	32,46	31,81	0,242	0,8%
	4229	31,28	33,81	31,86	0,320	1,0%
	4228	31,34	32,75	31,82	0,256	0,8%
SDS	4228	32,01	34,59	33,40	0,847	2,5%
	4227	32,03	34,67	33,41	0,833	2,5%
	4226	32,09	34,70	33,68	0,742	2,2%
CGLS	4227	39,15	41,01	39,75	0,531	1,3%
	4226	39,39	41,59	40,33	0,449	1,1%
	4225	39,84	42,19	41,00	0,378	0,9%
	4224	41,00	43,28	41,53	0,465	1,1%
	4223	41,30	44,18	42,27	0,650	1,5%
	4222	41,99	44,50	43,16	0,688	1,6%
	4221	42,79	44,50	43,89	0,544	1,2%
	4220	43,47	44,50	44,33	0,275	0,6%
	4219	44,14	44,50	44,49	0,049	0,1%
	4218	44,50	44,50	44,50	0,000	0,0%
	4217	44,50	44,50	44,50	0,000	0,0%
	4216	44,50	44,50	44,50	0,000	0,0%
	4215	44,50	44,50	44,50	0,000	0,0%
	4214	44,50	44,50	44,50	0,000	0,0%
	4213	44,50	44,50	44,50	0,000	0,0%
	4212	44,50	44,50	44,50	0,000	0,0%
4211	44,50	44,50	44,50	0,000	0,0%	
4210	44,50	44,50	44,50	0,000	0,0%	
4209	44,50	44,50	44,50	0,000	0,0%	

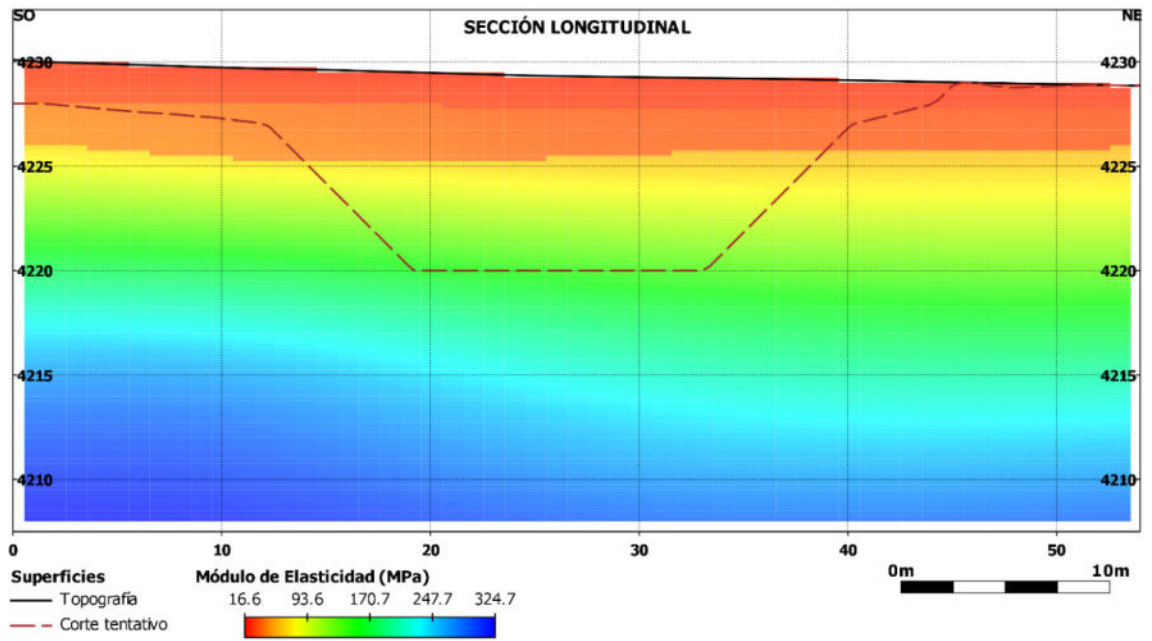
7. Sección longitudinal del área de evaluación con los resultados de densidad.



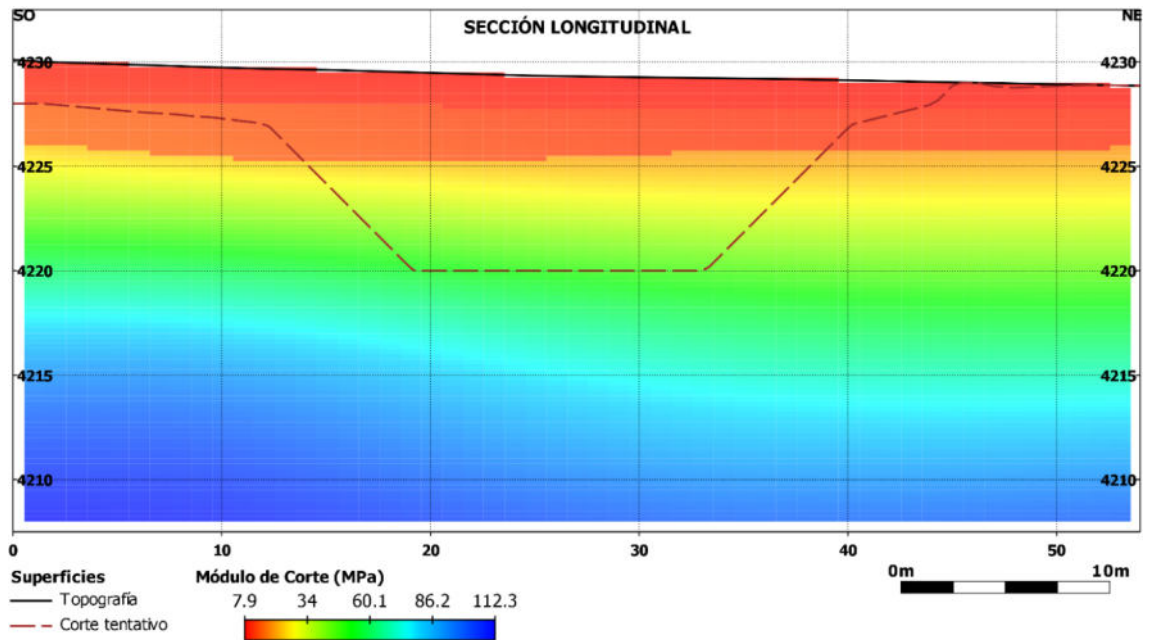
8. Sección longitudinal del área de evaluación con los resultados del coeficiente de Poisson.



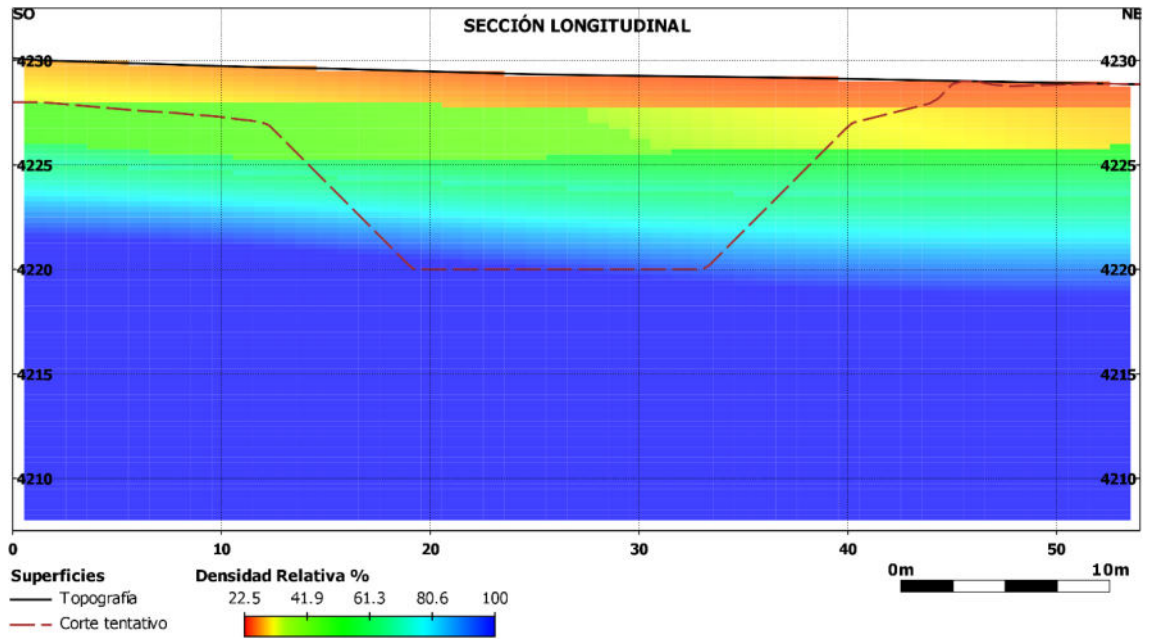
9. Sección longitudinal del área de evaluación con los resultados del módulo de elasticidad.



10. Sección longitudinal del área de evaluación con los resultados del módulo de corte.



11. Sección longitudinal del área de evaluación con los resultados de la densidad relativa.



12. Sección longitudinal del área de evaluación con los resultados del ángulo de fricción.

