

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA**



**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE SUELOS MEDIANTE  
MÉTODOS GEOFÍSICOS CON FINES DE CIMENTACIONES EN LA  
ASOCIACIÓN NEISER - LLACSA EN EL DISTRITO DE CIUDAD  
NUEVA – TACNA, 2024**

**TESIS**

**Presentada por:**

**Bach. Hernán Escobar Rivera**

**ORCID: 0009-0004-0912-1973**

**Asesor**

**Dr. Rick Milton Delgadillo Ayala**

**ORCID: 0000-0002-9763-1938**

**Para Obtener el Grado Académico de:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA**

**TACNA – PERÚ**

**2026**

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA**

Tesis

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE SUELOS MEDIANTE  
MÉTODOS GEOFÍSICOS CON FINES DE CIMENTACIONES EN LA  
ASOCIACIÓN NEISER - LLACSA EN EL DISTRITO DE CIUDAD  
NUEVA – TACNA, 2024**

Presentada por:

Bach. Hernán Escobar Rivera

Tesis sustentada y aprobada el 12 de agosto de 2026; ante el siguiente jurado  
examinador:

PRESIDENTE: Dr. ANIBAL JUAN ESPINOZA ARANCIAGA

SECRETARIO: MTRO. ROLANDO GONZALO SALAZAR CALDERÓN  
JUÁREZ

VOCAL: Dr. OSCAR WALTHER NOVOA CASTILLO

ASESOR: Dr. RICK MILTON DELGADILLO AYALA

## **DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD**

Yo Hernán Escobar Rivera, en calidad de bachiller de la Maestría en Ingeniería Civil con mención en Geotecnia de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificado (a) con DNI N° 00494175.

Soy autor (a) de la tesis titulada:

“CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE SUELOS MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS CON FINES DE CIMENTACIONES EN LA ASOCIACIÓN NEISER - LLACSA EN EL DISTRITO DE CIUDAD NUEVA –TACNA, 2024”,  
con asesor: Dr. Rick Milton Delgadillo Ayala.

### **DECLARO BAJO JURAMENTO**

Ser el único autor del texto entregado para obtener el grado académico de MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTÉCNIA, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para obtención de un grado académico en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin.

Así mismo, declaro no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual.

Declaro, que después de la revisión de la tesis con el software Turnitin se declara 06% de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto digital que presento junto al mismo.

Por último, declaro que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y soy conocedor (a) de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y que firmo la presente con pleno uso de mis facultades y asumiendo todas las responsabilidades de ella derivada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro o invento. De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Lugar y Fecha: Tacna, 12 de agosto de 2026



---

HERNAN ESCOBAR RIVERA  
DNI N° 00494175

### **DEDICATORIA**

A Dios por regalarme la fortaleza y todo lo que ha puesto en mi camino para escalar hasta el lugar donde me encuentro.

A mis hijos Arianna y Alexis Escobar, quienes han sido mi mayor motivación y fortaleza.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Escuela de Postgrado de la Universidad privada de Tacna por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios y concluirla de manera satisfactoria, también a mi asesor el Dr. Rick Delgadillo Ayala.

## INDICE DE CONTENIDO

|                                             |      |
|---------------------------------------------|------|
| DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD.....     | iii  |
| DEDICATORIA .....                           | v    |
| AGRADECIMIENTOS .....                       | vi   |
| INDICE DE CONTENIDO.....                    | vii  |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                      | x    |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                      | xi   |
| ÍNDICE DE ANEXOS.....                       | xiii |
| ÍNDICE DE APÉNDICE .....                    | xiv  |
| RESUMEN.....                                | xv   |
| ABSTRACT.....                               | xvii |
| INTRODUCCIÓN .....                          | 1    |
| 1. CAPÍTULO I: EL PROBLEMA.....             | 3    |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....         | 3    |
| 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....          | 5    |
| 1.2.1 Interrogante principal .....          | 5    |
| 1.2.2 Interrogantes secundarias .....       | 5    |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN ..... | 5    |
| 1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....     | 7    |
| 1.4.1 Objetivo general.....                 | 7    |
| 1.4.2 Objetivos específicos .....           | 7    |
| 2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....         | 8    |
| 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....  | 8    |
| 2.1.1 Antecedentes Internacionales.....     | 8    |
| 2.1.2 Antecedentes Nacionales .....         | 10   |

|       |                                            |    |
|-------|--------------------------------------------|----|
| 2.1.3 | Antecedentes Locales.....                  | 11 |
| 2.2   | BASES TEÓRICAS .....                       | 13 |
| 2.2.1 | Exploración de campo.....                  | 13 |
| 2.2.2 | Métodos directos.....                      | 13 |
| 2.2.3 | Métodos Indirectos.....                    | 15 |
| 2.2.4 | Método de refracción sísmica .....         | 18 |
| 2.2.5 | Parámetros de diseño de cimentaciones..... | 33 |
| 2.3   | DEFINICIÓN DE CONCEPTOS.....               | 34 |
| 3.    | CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO .....     | 37 |
| 3.1   | HIPÓTESIS .....                            | 37 |
| 3.1.1 | Hipótesis general.....                     | 37 |
| 3.1.2 | Hipótesis específicas .....                | 37 |
| 3.2   | OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....       | 37 |
| 3.2.1 | Identificación de variables .....          | 37 |
| 3.2.2 | Dimensiones.....                           | 37 |
| 3.2.3 | Escala para medición de variables .....    | 38 |
| 3.3   | TIPO DE INVESTIGACIÓN.....                 | 38 |
| 3.4   | NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....                | 38 |
| 3.5   | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....              | 39 |
| 3.6   | ANÁLISIS DE IMPACTO.....                   | 39 |
| 3.7   | ÁMBITO Y TIEMPO SOCIAL DEL ESTUDIO .....   | 39 |
| 3.8   | POBLACIÓN Y MUESTRA .....                  | 40 |
| 3.8.1 | Unidad de estudio.....                     | 40 |
| 3.8.2 | Población.....                             | 40 |
| 3.8.3 | Muestra.....                               | 40 |



|       |                                                               |    |
|-------|---------------------------------------------------------------|----|
| 3.9   | PROCEDIMIENTO, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....                   | 40 |
| 3.9.1 | Técnicas.....                                                 | 40 |
| 3.9.2 | Instrumentos.....                                             | 40 |
| 3.9.3 | Costo y Sostenibilidad.....                                   | 41 |
| 4.    | CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....                                  | 42 |
| 4.1   | DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO.....                         | 42 |
| 4.1.1 | Procedimiento .....                                           | 42 |
| 4.2   | DISEÑO DE LA PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.....              | 49 |
| 4.2.1 | Procesamiento Refracción Sísmica .....                        | 49 |
| 4.2.2 | Procesamiento MASW.....                                       | 56 |
| 4.3   | RESULTADOS .....                                              | 64 |
| 4.3.1 | Interpretación del Perfil de Refracción Sísmica.....          | 64 |
| 4.3.2 | Interpretación MASW .....                                     | 66 |
| 4.3.3 | Correlaciones Cuantitativas .....                             | 70 |
| 4.4   | PRUEBA ESTADÍSTICA.....                                       | 76 |
| 4.4.1 | Verificación de Normalidad de MASW y Refracción Sísmica. .... | 76 |
| 4.5   | COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS.....                                | 77 |
| 4.6   | DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....                                 | 80 |
|       | CONCLUSIONES .....                                            | 80 |
|       | RECOMENDACIONES .....                                         | 82 |
|       | REFERENCIAS.....                                              | 83 |
|       | APÉNDICE .....                                                | 86 |
|       | ANEXOS.....                                                   | 87 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tabla 1: Valores promedios de ondas compresionales <math>V_p</math>.....</i>                              | <i>20</i> |
| <i>Tabla 2: Factores de corrección (<math>\alpha</math>) según ancho de cimiento (<math>B</math>) .....</i>  | <i>32</i> |
| <i>Tabla 3: Operacionalización de Variables .....</i>                                                        | <i>38</i> |
| <i>Tabla 4: Ubicación geográfica de Refracción Sísmica .....</i>                                             | <i>43</i> |
| <i>Tabla 5: Ubicación geográfica de sondeos MASW .....</i>                                                   | <i>48</i> |
| <i>Tabla 6: Interpretación del perfil sísmico LRS-01 .....</i>                                               | <i>65</i> |
| <i>Tabla 7. Clasificación de suelos según la Norma Técnica Peruana E.030 .....</i>                           | <i>66</i> |
| <i>Tabla 8: Clasificación de suelos según IBC-2021 .....</i>                                                 | <i>66</i> |
| <i>Tabla 9: Verificación de Normalidad de datos MASW-1,2,3 y LRS-1.....</i>                                  | <i>76</i> |
| <i>Tabla 10: Prueba de Hipótesis Indicador Cohesión usando la prueba T de Student .....</i>                  | <i>78</i> |
| <i>Tabla 11: Prueba de hipótesis Indicador Capacidad portante ultima usando la prueba T de Student .....</i> | <i>79</i> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 1: Onda de cuerpo Primaria con velocidad de Onda <math>V_p</math>, Secundaria con velocidad de Onda <math>V_s</math>.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Figura 2: Ondas superficiales: Rayleigh (VR) y Love (VL) .....</i>                                                                   | <i>18</i> |
| <i>Figura 3: Esquema de Adquisición de Registros Sísmicos por Refracción.....</i>                                                       | <i>19</i> |
| <i>Figura 4: Frentes de onda y principio de Huygens .....</i>                                                                           | <i>21</i> |
| <i>Figura 5: Ley de refracción.....</i>                                                                                                 | <i>23</i> |
| <i>Figura 6: Ley de reflexión.....</i>                                                                                                  | <i>23</i> |
| <i>Figura 7: Ley de refracción Snell .....</i>                                                                                          | <i>24</i> |
| <i>Figura 8: Esquema de adquisición de registros sísmicos por sondeo MASW.....</i>                                                      | <i>25</i> |
| <i>Figura 9: Cimentación directa con reparto en Plano Horizontal .....</i>                                                              | <i>34</i> |
| <i>Figura 10: Información tiempo-distancia.....</i>                                                                                     | <i>36</i> |
| <i>Figura 11: Ámbito de Estudio y Ubicación de MASW y SST .....</i>                                                                     | <i>39</i> |
| <i>Figura 12: Instrumental de equipo Sísmica – Sismógrafo GEA24 PASI de 24 canales.....</i>                                             | <i>44</i> |
| <i>Figura 13: Línea de refracción sísmica alejado a la fuente.....</i>                                                                  | <i>50</i> |
| <i>Figura 14: Línea de refracción sísmica cercano a la fuente .....</i>                                                                 | <i>51</i> |
| <i>Figura 15: Sismograma de la Línea de Refracción Sísmica LRS-01 .....</i>                                                             | <i>52</i> |
| <i>Figura 16: Picado del arribo de las Ondas P.....</i>                                                                                 | <i>52</i> |
| <i>Figura 17: Dromocrona de la Línea de Refracción Sísmica LRS-01.....</i>                                                              | <i>54</i> |
| <i>Figura 18: Modelo inicial de Refracción Sísmica LRS-01 .....</i>                                                                     | <i>55</i> |
| <i>Figura 19: Perfil Tomográfico de Refracción Sísmica LRS-01.....</i>                                                                  | <i>55</i> |
| <i>Figura 20: Dispersión de Ondas Rayleigh de MASW-01, MASW-02 y MASW-03 .....</i>                                                      | <i>58</i> |
| <i>Figura 21: Espectro de Velocidades y Curvas de Dispersión de MASW-01, MASW-02, MASW-03.....</i>                                      | <i>60</i> |
| <i>Figura 22: Perfil Unidimensional de MASW-01, MASW-02 y MASW-03.....</i>                                                              | <i>62</i> |
| <i>Figura 23: Rango de <math>V_p</math> obtenidas para el perfil de Refracción Sísmica LRS-01</i>                                       | <i>64</i> |
| <i>Figura 24: Perfil de Refracción Sísmica LRS-01 .....</i>                                                                             | <i>65</i> |
| <i>Figura 25: Modelo unidimensional y resultados MASW-01 .....</i>                                                                      | <i>68</i> |
| <i>Figura 26: Modelo unidimensional y resultados MASW-02 .....</i>                                                                      | <i>69</i> |

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 27: Modelo unidimensional y resultados MASW-03 .....</i>                                     | <i>70</i> |
| <i>Figura 28: Correlación entre la velocidad de onda S y ángulo de fricción <math>\phi</math>.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Figura 29: Correlación de Módulo de Poisson Vs VP/VS.....</i>                                       | <i>72</i> |
| <i>Figura 30: Ajuste de regresión lineal para distribución de densidad en LRS-01</i>                   | <i>74</i> |
| <i>Figura 31: Correlación de capacidad admisible y profundidad MASW-01 y LRS-<br/>001 .....</i>        | <i>75</i> |
| <i>Figura 32: Relación de velocidad (Vs) y resistencia a la compresión (<math>q_u</math>).....</i>     | <i>75</i> |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>ANEXO 1: Refracción y Análisis multicanal de onda superficiales .....</i>       | <i>87</i>  |
| <i>ANEXO 2: Modelo unidimensional y resultados .....</i>                           | <i>96</i>  |
| <i>ANEXO 3: Cálculo de la capacidad admisible.....</i>                             | <i>103</i> |
| <i>ANEXO 4: Perfiles de densidad en base a velocidad onda P.....</i>               | <i>106</i> |
| <i>ANEXO 5: Perfil Longitudinal de Análisis multicanal de onda superficiales .</i> | <i>108</i> |
| <i>ANEXO 6: Panel Fotográfico .....</i>                                            | <i>111</i> |

## **ÍNDICE DE APÉNDICE**

|                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>APÉNDICE 1:Matriz de consistencia del informe final de tesis. ....</i> | <i>114</i> |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|

## RESUMEN

En el Perú, la ejecución de obras civiles de gran, mediana y pequeña envergadura se debe ejecutar considerando la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones, dicha norma considera los perfiles de suelos en función de sus propiedades mecánicas, tomando en consideración la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte, o alternatively, para suelos granulares, considera el promedio ponderado de los N60 obtenidos mediante un ensayo (SPT), posteriormente considera cinco perfiles a tener en cuenta.

Tal es así, que, en la Asociación Neisser Llacsá ubicado en el Distrito de Ciudad Nueva, región Tacna, existe proyectos ejecutados y en ejecución (Vías y veredas, reservorio, muros de contención), donde se requiere las propiedades mecánicas del suelo, para predecir el comportamiento del suelo, cuando inicia el comportamiento de los elementos estructurales, asimismo, el crecimiento poblacional en dicha zona de estudio, existe la necesidad de contar con los parámetros mecánicos del suelo, necesarios para una correcta toma de decisión en el diseño de cimentación de sus viviendas, evitando así, asentamiento y deformaciones, del mismo modo en los muros de contención el desplazamiento que se puede presentar, aunado a ello la resistencia de suelo y la deformación del mismo necesario para las cargas que se aplican.

Al respecto, en el presente trabajo de investigación se obtuvieron propiedades mecánicas del área de estudio, específicamente en la calle Intiorko, se realizaron la caracterización de suelo mediante método indirecto, utilizando para ello los métodos geofísicos: Análisis de Ondas superficiales MASW y Refracción Sísmica, para ello se utilizaron equipos de prospección geofísica. Mediante refracción sísmica se obtuvieron velocidades de ondas compresionales  $VP=700\text{m/s}$  en el primer estrato y  $VP=800\text{m/s}$  a  $988\text{m/s}$  en los siguientes estratos, y en estratos inferiores mayores a lo indicado, hasta 15m de profundidad.

Asimismo, con MASW se tiene los resultados de ondas de corte  $V_s$  se procedió con la caracterización según la norma E.030, entre los tipos  $S_1$  y  $S_2$  suelos intermedios, suelos muy rígidos donde las velocidades de ondas de corte están entre  $V_s=291\text{m/s}$

y 585m/s, además la velocidad promedio a 30m de profundidad es  $V_{s30}=455.3\text{m/s}$ , posteriormente se relaciona entre el parámetro de unión entre las partículas del suelo y la velocidad de ondas de corte, obteniendo una relación de 0.6114. Finalmente, la relación entre la estructura y suelo de cimentación se ha relacionado mediante la rigidez con la relación de la velocidad compresional y de corte ( $V_P/V_S$ ), obteniendo valores entre 99.62% y 99.87% lo que indica una alta correlación entre estas propiedades de zona de estudio.

**PALABRAS CLAVES:** Caracterización Geotécnica, MASW, propiedades físicas de suelos y propiedades mecánicas.



## **ABSTRACT**

In Peru, the execution of large, medium, and small-scale civil works must be carried out considering Technical Standard E.030 "Earthquake-Resistant Design" of the National Building Regulations. This standard considers soil profiles based on their mechanical properties, taking into account the average shear wave velocity, or alternatively, for granular soils, the weighted average of the N60 values obtained through a standardized test (SPT). It then considers five profiles to be taken into account.

This is the case, for example, in the Neisser Llacsá Association located in the Ciudad Nueva District, Tacna region, there are completed and ongoing projects (roads and sidewalks, reservoir, retaining walls) where the mechanical properties of the soil are required to predict soil behavior when structural elements begin to show signs of strain. Furthermore, the population growth in this study area necessitates having the necessary soil mechanical parameters for making sound decisions in the foundation design of homes, thus preventing settlement and deformation. Similarly, in the retaining walls, the potential displacement, soil resistance, and the deformation required to withstand applied loads are also crucial.

In this research, the mechanical properties of the study area, specifically Intiorko Street, were obtained. Soil characterization was performed using an indirect method, employing geophysical techniques: MASW (Surface Wave Analysis) and Seismic Refraction. Geophysical prospecting equipment was used for this purpose. Seismic refraction yielded compressional wave velocities of 700 m/s in the first stratum and 800 m/s to 988 m/s in subsequent strata, with velocities exceeding these values in lower strata down to a depth of 15 m.

Furthermore, using MASW, the shear wave velocity (VS) results were obtained and characterization was performed according to standard E.030. The soils classified as S1 and S2 are intermediate and very stiff, with shear wave velocities ranging from

VS = 291 m/s to 585 m/s. The average velocity at a depth of 30 m was VS30 = 455.3 m/s. Subsequently, the relationship between the soil particle bond strength and the shear wave velocity was analyzed, yielding a ratio of 0.6114. Finally, the relationship between the structure and the foundation soil was correlated by assessing the stiffness of the soil with the compressional or shear velocity ratio (VP/VS), obtaining values between 99.62% and 99.87%, indicating a high correlation between these properties in the study area.

**KEYWORDS:** Geotechnical Characterization, Physical Properties of Soils, and Mechanical Properties.

## INTRODUCCIÓN

En lugares donde se quiere construir viviendas, o se planea la ejecución de obras civiles de gran envergadura, resulta indispensable recopilar información detallada sobre las condiciones del subsuelo. Esta información constituye una herramienta fundamental para profesionales como el ingeniero estructural, el ingeniero geotécnico y el geólogo, ya que permite establecer parámetros clave, entre ellos la estratigrafía del terreno, la compacidad del suelo de cimentación, la selección y el dimensionamiento del sistema de fundación, la profundidad a la que se localiza un estrato competente, la identificación de depósitos de roca sana o alterada, la detección de fallas geológicas y la determinación del nivel freático, entre otros aspectos. Todo ello incide directamente en los costos relacionados con las actividades de movimiento de tierras y construcción de la obra.

En algunos casos, el estudio de Mecánica de Suelos puede ser limitada para establecer los parámetros geotécnicos requeridos; por ello, se puede optar métodos alternativos, como el Métodos Sísmico.

Para la evaluación geotécnica de suelos a través de métodos geofísicos con fines de cimentaciones en la asociación Neiser - Llacsá en el distrito de Ciudad Nueva - Tacna, 2024, se realizaron pruebas de refracción sísmica y método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), el cual consiste en disponer una serie de sensores (geófonos) a lo largo de un perfil, generando una fuente de vibración en un punto específico.

Con la refracción sísmica se determinó la velocidad de ondas primarias o de compresión ( $V_P$ ), para luego evaluar la velocidad de ondas secundarias o de corte ( $V_S$ ). Utilizando los resultados, se puede determinar la rigidez del suelo mediante parámetros como el módulo de cortante ( $G$ ) y módulo de elasticidad ( $E$ ). Estos valores pueden emplearse tanto en el análisis de problemas dinámicos, como en efectos sísmicos, así como en el diseño de cimentaciones sometidas a cargas estáticas.

Con el propósito de alcanzar el objetivo propuesto, la presente investigación se estructura en los capítulos que se detallan a continuación:

Capítulo I: El Problema: En esta sección se expone la justificación del problema y los objetivos que pretende la presente investigación.

Capítulo II: Marco Teórico: Esta sección presenta la base conceptual y la información relevante que sustenta la investigación, evidenciando su viabilidad.

Capítulo III: Marco Metodológico: Esta sección describe los procedimientos, técnicas e instrumentos utilizados para la recolección y análisis de los datos.

Capítulo IV: Resultados: Aquí se exponen y analizan los resultados obtenidos a partir de las mediciones geotécnicas de cada una de las propiedades.

Capítulo V: Conclusiones: Finalmente, se presentan las conclusiones derivadas del estudio, en las cuales se verifica el cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente.

## **1. CAPÍTULO I: EL PROBLEMA**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El proceso de cambios que enfrenta las grandes ciudades del mundo y Latinoamérica, en el último siglo se ha caracterizado por el crecimiento significativo en la población urbana, y ha conllevado al aumento apresurado en la construcción de viviendas sin planificación urbana, el aumento en la apertura de las vías de acceso, redes de agua y alcantarillado a lo largo y ancho de toda la ciudad. Asimismo, el último sismo de gran magnitud que impactó la región de Tacna y otras ciudades vecinas, se registró el 23 de junio de 2001, generando daños significativos, sobre todo en los distritos de Alto de la Alianza y Ciudad Nueva, de la región de Tacna, donde según las investigaciones predominan suelos de tipo areno-limoso. En este contexto, se plantea la necesidad de analizar los registros provenientes de aparatos acelerográficos y aplicar métodos sísmicos basados en las propiedades dispersivas de las ondas Rayleigh, como el MASW (Análisis de Arreglo Multicanal de Ondas Superficiales) activo, refracción sísmica, Down Hole entre otras. Con esta información se determina las aceleraciones, velocidades y desplazamientos del terreno, los perfiles de ondas corte (Vs) y parámetros elásticos, permitiendo una caracterización geotécnica precisa del suelo. En este sentido, resulta fundamental conocer la composición y caracterización del subsuelos, debido a que, para la ejecución de diversos tipos de obras e infraestructuras, las normativas vigentes en cada país exigen la realización de estudios previos, por lo que es preciso contar con estudios que nos ayude a constatar la distribución de perfil del subsuelo en las áreas identificadas de una determinada ciudad, en particular en la asociación Neiser - Llacsá ubicado en el distrito de Ciudad Nueva, región Tacna.

Tal es el caso de la ciudad de Guadalajara y Jalisco México, donde se consideró la caracterización de los suelos arenosos mediante el método de ondas de superficie. Por ello en el año 2007 se concluyó que una de las principales ventajas de los métodos basados en ondas superficiales radica en su carácter no invasivo, lo que permite evaluar la estructura natural del suelo sin generar alteraciones significativas. Esto contrasta con lo que ocurre en ensayos de penetración y la

mayoría de las pruebas de campo, donde sí se producen modificaciones en el terreno analizado. (Díaz del Castillo, 2007)

Según la investigación realizada en la tesis de grado “Aplicación de metodologías geofísicas para la caracterización geológico – geotécnica con fines de cimentación de la urbanización las Lomaditas de Cayma – Arequipa”, se determinó, mediante sísmica de refracción, que las velocidades de las ondas compresionales ( $V_p$ ) en la zona de estudio oscilan entre 432 y 1187 m/s. Según la norma ASTM D 5777-95, los estratos superficiales corresponden a suelos intemperizados con velocidades de 204 a 604 m/s, mientras que las capas más profundas de gravas y arenas presentan velocidades de 460 a 915 m/s. Además, la caracterización geotécnica indicó que el terreno posee una capacidad de carga admisible ( $q_{adm} = 1.488 \text{ kg/cm}^2$ , por lo que se recomienda el empleo de cimentaciones superficiales, específicamente zapatas rectangulares de 1.5 m de ancho, 2 metros de largo y 1.5 metros de profundidad, enlazadas mediante vigas de cimentación y/o de unión (Heras Muchica, 2022).

La región Tacna no es ajena al crecimiento significativo de la población urbana, sobre todo en los distritos de Ciudad Nueva, Alto de la Alianza, Cnel. Gregorio Albarracín Lanchipa y Pocolay.

Al respecto, en el documento de Plan de Desarrollo Urbano (PDU) - 2015 al 2025, emitido por la Municipalidad provincial de Tacna, establece la zonificación del suelo para actividades de pequeña industria (vivienda–taller), uso pecuario, entre otros. En tal sentido, en el distrito de Ciudad Nueva se ha incrementado los posesionarios en las laderas del cerro Intiorko específicamente en la asociación Neiser Llacsá, construyendo sus viviendas de manera inadecuada sin la consideración de la calidad de suelo de cimentación, llegando incluso a viviendas de hasta dos pisos en el área de estudio.

## 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo al planteamiento del problema se tiene la siguiente interrogante general.

### 1.2.1 Interrogante principal

¿Es posible la caracterización geotécnica de suelos mediante métodos geofísicos con fines de cimentaciones en la asociación Neiser - Llacsá en el distrito de Ciudad Nueva - Tacna, 2024?

### 1.2.2 Interrogantes secundarias

Con el propósito de atender la interrogante planteada, se formulan las siguientes preguntas como problemas secundarios.

1. ¿Es posible examinar el perfil del subsuelo mediante el sondeo de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW-1D)?
2. ¿Es posible estimar las velocidades de las ondas compresionales ( $V_p$ ) y de corte ( $V_s$ ), mediante métodos geofísicos?
3. ¿Es posible estimar de manera indirecta utilizando las velocidades de las ondas ( $V_p$ ) y ( $V_s$ ), así como los módulos de elasticidad, de corte y volumétrico, el coeficiente de Poisson y la capacidad de carga admisible del terreno?
4. ¿Es posible la elaboración de planos de isovalores de la relación  $V_p/V_s$  y módulo Poisson para determinar la calidad de suelo con fines de cimentación?

## 1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

**Justificación Social:** Radica en el impacto directo que tiene sobre la calidad de vida de los habitantes, el crecimiento urbano sostenible, la seguridad de las construcciones, por ello, con la presente investigación se pretende que la población de la asociación Neyser Llacsá pueda tener los resultados de la caracterización de suelo donde se encuentra sus viviendas de manera indirecto, es decir sin realizar excavaciones. Socialmente la utilización de este método permitirá tomar decisiones

informadas y ejecutar las construcciones públicas y privados seguras y eficientes, en dicha zona de expansión urbana del distrito de Ciudad Nueva.

**Justificación Científica:** Con la obtención de las características de los suelos, parámetros geotécnicos y dinámicos, se plantea alternativas de tipo de cimentación, para proyectos de edificaciones dentro del área de la Asociación Neyser Llacsá. Por ello, resulta necesario conocer dichas propiedades físicas y mecánicas del terreno, presentando de forma oportuna y adecuada los valores determinados producto de la aplicación de métodos indirectos.

La justificación social radica en:

- Evita construcciones en suelos inestables que pueden generar derrumbes, hundimientos o fallas estructurales.
- Permite un uso adecuado del suelo, evitando construir en zonas con riesgo geotécnico o ambiental.
- Facilita la identificación de zonas propensas a licuefacción, deslizamientos, por la presencia de eventos sísmicos.
- Ayuda a evitar construcciones en áreas de baja capacidad portante de suelo, con riesgo de afectación a la estructura de las viviendas.
- Optimiza los costos de construcción, evitando sobrecostos por fallas técnicas o reconstrucciones.

Asimismo, se precisa que según la Norma E-030, los perfiles de suelo se organizan considerando la velocidad promedio de las ondas de corte ( $V_s$ ), considerando que dichas caracterizaciones se estiman en los primeros 30 metros, desde el nivel de referencia de la cimentación.

**Justificación Económica:** Con los resultados obtenidas mediante el uso de métodos indirectos se proporcionará a la Asociación Neyser Llacsá perfil del suelo



tomando en cuenta la velocidad de corte, ello permitirá la reducción de costos en la construcción de edificaciones, vías de accesos, muros estructurales, ya que, al conocer las propiedades de suelo, se puede utilizar dichos datos para los estudios definitivos y detalles de las cimentaciones de las nuevas estructuras, con ello se estará optimizando los recursos económicos de la población y de las entidades públicas.

## **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 Objetivo general**

Establecer la caracterización geotécnica de suelos mediante métodos geofísicos con fines de cimentaciones en la asociación Neiser - Llacsá en el distrito de Ciudad Nueva - Tacna, 2024.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Estimar el perfil del subsuelo mediante el sondeo de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW-1D).
2. Determinar las velocidades de las ondas compresionales ( $V_p$ ) y de corte ( $V_s$ ), mediante métodos geofísicos.
3. Estimar de manera indirecta a partir de las velocidades de ondas ( $V_p$ ) y ( $V_s$ ), los módulos de elasticidad, de corte y volumétrico, así como el coeficiente de Poisson y capacidad de carga del terreno.
4. Determinar el plano de isovalores de la relación  $V_p/V_s$  y módulo Poisson para obtener la capacidad de carga admisible del terreno.

## **2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **2.1.1 Antecedentes Internacionales**

En relación a las investigaciones realizadas en geotecnia, es posible relacionar el presente trabajo de investigación, con las siguientes teorías, artículos científicos y tesis desarrollados a nivel internacional, nacional y local.

Es así, que en el estudio realizado sobre la análisis geotécnica de los suelos de Madrid mediante el método ReMi (refraction microtremor), donde entre algunas conclusiones indica que, esta técnica constituye una herramienta práctica y altamente efectiva para la evaluación geotécnica de los suelos en Madrid. Entre sus principales ventajas se encuentra la capacidad de generar perfiles de velocidad de propagación de ondas S (Vs), lo que permite evaluar la rigidez del terreno y su comportamiento, del mismo modo la variación con la profundidad, sobre todo en áreas urbanas (Perez, 2015).

En dicho estudio se concluye que la técnica de ReMi presenta una alta capacidad de resolución para la caracterización del suelo en los primeros 30 metros de profundidad, especialmente cuando se incrementa el contenido de altas frecuencias de ruido ambiental mediante golpes aleatorios con martillo a lo largo de la línea de geófonos. Además, esta técnica permite identificar la presencia de capas de menor rigidez subyacentes a estratos más competentes.

En consecuencia, esta condición se presenta con frecuencia en los suelos de Madrid, como resultado de la modificación del terreno por el arrastre de finos, las variaciones laterales de facies detríticas o la disolución de yesos. Asimismo, la técnica ReMi utiliza el mismo equipo y configuración de la línea de geófonos que la sísmica de refracción, lo que permite determinar las velocidades de propagación de las ondas S (Vs) y P (Vp) en un mismo sitio (Perez, 2015).

Con respecto a, otro estudio realizado en México, Guadalajara y de la costa de Jalisco denominado “Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie”, en dicho trabajo se muestran distintas aplicaciones en suelos arenosos de Guadalajara y zonas costeras de Nayarit y Jalisco, evidenciando la utilidad de la técnica ReMi para estimar velocidades de onda de corte (Vs). Con

base en estos resultados, se logró caracterizar la respuesta sísmica de los suelos y estimar los asentamientos de las zapatas en las cimentaciones; en términos generales, se resalta la aplicabilidad de los métodos desarrollados mediante las ondas superficiales como una alternativa eficiente para obtener la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) de manera rápida y confiable. Es así que, en dicho estudio se concluye que, una de los principales beneficios de los métodos de ondas superficiales radica en su carácter no invasivo, lo que permite analizar la estructura natural del suelo sin generar alteraciones. Esto contrasta con lo que sucede en ensayos de penetración y en la mayoría de las pruebas de campo, donde sí se producen deformaciones en el terreno (Lazcano, 2007).

Por otra parte, en el estudio sobre el “Análisis geotécnico y zonificación para evaluar la capacidad de carga permitida en la ciudad de Iranshahr - Este de Irán”, se detalla que, los mapas de zonificación geotécnica son factores importantes y necesarios para lograr un desarrollo urbano sostenible.

De este modo, la reducción de daños en proyectos de construcción y eventos como hundimientos de terreno, movimientos de ladera, etc., requiere la preparación de mapas de zonificación geotécnica precisos. Por consiguiente, la información detallada sobre las características físicas y mecánicas del suelo, estos mapas, y además de proporcionar una especie de previsión de las condiciones de las diferentes zonas de la región, también pueden proporcionar una perspectiva de los puntos potenciales para la ejecución de proyectos específicos de desarrollo.

Por último, los resultados obtenidos del análisis y la zonificación geotécnica del área de estudio, proporcionan una visión general de la aplicación y las previsiones necesarias para proyectos actuales y futuros en la región de Iranshahr- Este de Irán. En definitiva dicha evaluación y clasificación de la capacidad portante del suelo para cimientos con una anchura y profundidad de 1,0m y una anchura de 2,0m y 1,5m de profundidad, evidencian variaciones en su comportamiento, especialmente en las zonas norte y sur del área estudiada (Pourkermani & Almasian, 2021).

En relación, al estudio titulada “Caracterización Geotécnica a través del uso de Ondas Rayleigh -Santiago de Chile”, en donde resulta que, el método basado en ondas superficiales resulta eficaz para determinar el perfil de velocidades de onda

de corte en profundidad, sin necesidad de realizar perforaciones o intervenciones directas en el terreno. En conclusión, se destaca que este método permite evaluar grandes extensiones de suelos de forma eficiente y global (Ochoa, 2007).

### 2.1.2 Antecedentes Nacionales

Sobre las investigaciones realizadas referente a la caracterización de suelos mediante los métodos geofísicos a nivel nacional se tiene lo siguiente:

En relación, al estudio realizado sobre la aplicación del ensayo MASW para determinar la velocidad de ondas de corte y su correlación con el ensayo de penetración con cono (CPT), se concluye que es de interés el estudio del análisis multicanal de ondas superficiales - (MASW) constituye un método de examinación sísmica para calcular las velocidades de ondas de corte, sobre todo cuando no se dispone de información previa del terreno de estudio, más que la geología, o alguna visita del terreno para un reconocimiento geológico. Sin embargo, antes del desarrollo del MASW, introducido a finales de la década de 1990, existió primero el método de análisis espectral de ondas superficiales - Spectral Analysis Of Surface Waves (SASW). En la actualidad el ensayo MASW goza de mayor aceptación debido a las ventajas que presenta frente a su predecesor (SASW) (Park et al., 1999). Esto se debe a que la adquisición de datos mediante el método de MASW es relativamente ágil y eficiente, requiere menos etapas de procesamiento y permite identificar las propiedades de las dispersivas de múltiples modos en los registros de ondas superficiales; en consecuencia, facilita la generación de imágenes de dispersión en dos o tres dimensiones con mayor confiabilidad (Rebata, 2021).

Además, según (Heras, 2022) en su estudio titulado “Aplicación de metodologías geofísicas para la caracterización geológico- geotécnica con fines de cimentación de la Urbanización las Lomaditas de Cayma – Arequipa”, en su análisis indica que se aplicaron tres técnicas geofísicas, entre ellas dos de tipo sísmico: la refracción sísmica y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW). Estas permitieron estimar de manera indirecta a partir de las velocidades de propagación de ondas sísmicas ( $V_p$ ) y ( $V_s$ ), la capacidad portante admisible del suelo y los parámetros elásticos requeridos para el diseño de cimentaciones, tales como el módulo de

elasticidad, módulo de corte, módulo volumétrico y el coeficiente de Poisson. Asimismo, se complementó la investigación con métodos geotécnicos directos mediante la ejecución de dos calicatas de hasta 3 m de profundidad, con la finalidad de validar y correlacionar los resultados obtenidos por las técnicas geofísicas. Por lo tanto, los resultados obtenidos muestran que las velocidades de las ondas sísmicas compresionales ( $V_p$ ) oscilan entre 432 m/s y 1187 m/s, distribuidas en al menos en tres niveles con espesores variables de 1 a 13 m. Las velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) presentan valores comprendidos entre 303,2 m/s a 437,6 m/s. Asimismo, la capacidad de carga admisible del terreno varía desde 0.731 kg/cm<sup>2</sup> a 2.426 kg/cm<sup>2</sup> hasta los 30 metros de profundidad, obteniendo el valor 1.488 kg/cm<sup>2</sup> como base para diseño de cimiento de tipo superficial. En consecuencia, indica que el área de estudio presenta suelos con resistencia adecuada, con una capacidad admisible del suelo mínima de  $q_{adm} = 1.488$  kg/cm<sup>2</sup> y ausencia de nivel freático. Se recomienda emplear cimentaciones tipo zapata rectangular con dimensiones de 1,50 m de ancho, 2,00 m de largo y 1,50 m de profundidad de desplante, proporcionando estabilidad a edificaciones convencionales de dos o tres niveles. Asimismo, con la adecuada selección de técnicas constructivas y materiales de calidad, se logra reducir el riesgo frente a fenómenos naturales de gran magnitud.

### **2.1.3 Antecedentes Locales**

En el ámbito local, Maquera (2017) en su tesis de grado, concluye que los mapas de isovalores contribuyen a mejorar la toma de decisiones por parte de las autoridades frente al incremento del área urbana y para reducir los efectos de los sismos. Dichos mapas permiten identificar áreas apropiadas para cimentaciones aisladas, así como zonas donde se recomiendan cimentaciones vinculadas o losas de cimentación, considerando que la zona de análisis corresponde a tipo de suelo arenas limosas.

Asimismo, recomienda a los propietarios de terrenos como a la Municipalidad Distrital de Alto de la Alianza que tengan en cuenta estos estudios y los valores de la capacidad de carga al momento de seleccionar el tipo de cimentación superficial más adecuado.

Finalmente, en dicha investigación de grado, se infiere que, no se garantiza la edificación de viviendas de niveles superiores a dos, ya que se pueden producir desprendimiento de los taludes de corte de las terrazas ejecutadas para el sostenimiento de las viviendas, ello debido a que los factores de seguridad en estos lugares son (Sherrif, 2011) inferiores a 1,20 en condiciones pseudoestáticas. Según la caracterización de suelos de dicha zona de estudio se tiene la capacidad portante admisible del depósito Tecnógeno (SM) se encuentra entre 0,73 y 0,81 kg/cm<sup>2</sup>, considerada muy baja. Asimismo, la capacidad admisible de los depósitos Coluvio-Deluvial (SM) es de 0,78 kg/cm<sup>2</sup>, igualmente calificada como muy baja (Cabrera, 2018).

Además, en el boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Publicación especial N° 15, donde se presenta el trabajo “Caracterización geotécnica de la ignimbrita Pachía mediante técnicas tradicionales y geofísicas de refracción sísmica y microtemores (MASW), distrito de Pocollay-Tacna”, donde presenta los resultados que se obtuvo. Dicho estudio se llevó a cabo la caracterización geotécnica de la Ignimbrita Pachía aplicando ensayos estándar y especiales de Mecánica de Suelos, lo que permitió estimar sus propiedades geotécnicas. Complementariamente, se aplicaron métodos geofísicos, incluyendo ensayos de Refracción Sísmica y MASW, obteniéndose velocidades de ondas P (Vp) y S (Vs) a 2 metros de profundidad. Los valores registrados para Vp oscilaron entre 455,56m/s a 833,67 m/s, las Vs entre 290,05 a 461,34 m/s. A partir de los valores de Vp y Vs se obtuvieron los parámetros dinámicos del suelo, obteniéndose módulos de elasticidad (E) en un rango de 273,05 a 692,47 MPa y módulos de corte (G) entre 114,64 y 297,65 MPa a 2 metros de profundidad, del mismo modo se determinaron los asentamientos utilizando tanto métodos geofísicos como el ensayo de consolidación unidimensional, obteniéndose valores de 0,53 a 0,61 cm mediante el método geofísico (Machaca, 2020).

## **2.2 BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1 Exploración de campo**

La exploración de campo es una etapa fundamental en la concepción de proyectos ya que permite conocer y recolectar datos del terreno y el entorno donde se llevará a cabo un proyecto, asegurando que las soluciones planteadas sean las más adecuadas y seguras.

Para ejecutar cualquier proyecto de construcción, ya sean de infraestructura pública o privada, es fundamental conocer la estratigrafía y las características del suelo. Esta información se obtiene mediante un estudio geotécnico, que comprende la exploración del terreno, la recolección de muestras alteradas o inalteradas, la implementación de pruebas en el laboratorio y el posterior análisis de los datos recolectados.

Por ello, los resultados de un estudio geotécnico dependen en gran medida de la calidad de los trabajos de exploración, los cuales deben ejecutarse de manera rigurosa, siguiendo los procedimientos, técnicas y normativas establecidas.

Las técnicas de exploración del subsuelo en geotecnia, se clasifican principalmente en métodos directos e indirectos.

### **2.2.2 Métodos directos.**

Estos métodos recolectan muestras que permiten evaluar las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo. Tanto las muestras alteradas como las inalteradas, son esenciales cuando se busca determinar parámetros mecánicos a través de ensayos de laboratorio, como corte directo, la compresión triaxial, entre otros.

#### **2.2.2.1 Calicatas.**

Es una de las prospecciones más empleadas para el reconocimiento superficial del terreno. Consiste en excavaciones efectuadas en forma manual o con equipos mecánicos convencionales que facilitan la observación directa del terreno objeto de

estudio. Debido a su bajo costo y a la rapidez con la que se realizan, se consideran un recurso común en cualquier tipo de sondeo o investigación en el lugar de subsuelo, asimismo, de los especímenes obtenidos es posible determinar las características químicas, físicas del suelo.

#### **2.2.2.2 Suelos**

Según (Crespo, 2004), en un contexto general, el suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material, originada por la alteración superficial de las rocas por efectos físicos, biológicos y químicos. En este sentido, el suelo está constituido por una combinación de minerales inorgánicos y materia parcialmente descompuesta, organizada en diferentes estratos u horizontes.

Para el desarrollo de esta investigación, el suelo es analizado desde la perspectiva para el diseño de los proyectos ingenieriles, empleándose el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) para la identificación de los tipos de suelo.

#### **2.2.2.3 Geotecnia**

La geotecnia se encarga del estudio de las características y propiedades mecánicas de los suelos, las rocas y otros materiales que constituyen el terreno donde se desarrollan infraestructuras como edificaciones, vías, presas, líneas férreas, entre otros. Es decir, su propósito es garantizar que las condiciones geológicas, en particular las propiedades físicas y mecánicas del suelo, sean adecuadas para la ejecución segura y eficiente de dichas construcciones (Crespo, 2004).

#### **2.2.2.4 Propiedades geotécnicas de suelo**

En relación a la granulometría, la plasticidad, la compresibilidad y la resistencia al corte, pueden ser evaluadas mediante ensayos de laboratorio apropiados. No obstante, en los últimos años se ha priorizado la evaluación in situ de los parámetros de resistencia y deformación, ya que este enfoque permite evitar la alteración de las muestras durante las actividades de exploración en campo (Braja, 2007).



### **2.2.2.5 Caracterización geotécnica de suelo**

Los estudios geotécnicos, tiene como propósito fundamental analizar y cuantificar las propiedades físicas, químicas y mineralogía del suelo, cuyo comportamiento resulta fundamental cuando se emplea como elemento de soporte para estructuras, especialmente en el caso de las cimentaciones. Asimismo, los suelos pueden clasificarse mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el método propuesto por la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO), los cuales permiten estimar la capacidad portante o admisible de suelo con fines de cimentación.

### **2.2.3 Métodos Indirectos**

Este método se caracteriza por obtener información requerida sobre las propiedades físicas del terreno a partir del análisis de variables y la conformación más adecuada que presente el medio estudiado, sin requerir la extracción de muestras.

#### **2.2.3.1 Métodos Geofísicos**

En los últimos años, los métodos geofísicos han impulsado significativamente el desarrollo de las geociencias, convirtiéndose en herramientas fundamentales para el reconocimiento geotécnico del terreno. Estos permiten identificar las propiedades geológicas y geotécnicas presentes en una zona en estudio. En el caso de las matrices rocosas, contribuye a identificar las características físicas de las rocas, así como las condiciones geomecánicas de la zona en estudio mediante un proceso de calibración (Sherrif, 2011).

#### **2.2.3.2 Ondas sísmicas:**

Las ondas sísmicas también conocidas como ondas elásticas, corresponden a la propagación de perturbaciones temporales del campo de esfuerzos que generan pequeños desplazamientos dentro de un medio. Estas pueden

originarse por movimientos telúricos naturales, cuyos eventos de mayor magnitud pueden ocasionar daños en áreas urbanas.

Asimismo, las ondas sísmicas pueden producirse de manera artificial (explosiones, golpes en el terreno, etc.), estas ondas artificiales son utilizados en la exploración e investigación geofísica. Estas ondas se dividen en dos categorías: las ondas corporales y las ondas superficiales.

### 2.2.3.3 Ondas Superficiales

Para este tipo de caso, se dispone de la solución planteada por Rayleigh (1885), quien dio solución al problema de las ondas elásticas que generan tensiones paralelas a la superficie en un medio semi-infinito, donde se genera una disminución de la rigidez del cuerpo en la superficie e induciendo un movimiento de las partículas vertical y horizontal.

Para un material homogéneo, las velocidades del medio no varían con la frecuencia por lo que es posible describir mediante la siguiente ecuación:

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

Y se puede aproximar a:

$$V_r = \frac{0.874 + 1.117\nu}{1 + \nu} * V_s$$

### 2.2.3.4 Ondas corporales:

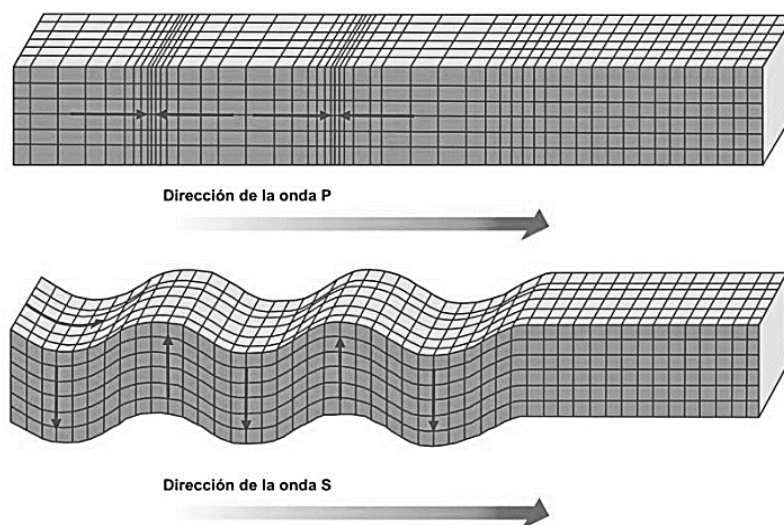
Las ondulaciones que se transmiten al interior de la Tierra se denominan corporales, mientras que aquellas que se desplazan sobre su superficie corresponden a ondas superficiales. Los tipos principales de ondas sísmicas son:

**Ondas P** (ondas primarias o de compresión): Son las ondas sísmicas cuyo módulo de velocidad son mayores y pueden propagarse a través de sólidos,

líquidos y gases. Su movimiento provoca que las partículas se muevan en la misma dirección que la onda, generando ciclos de compresión y expansión.

Ondas **S** (ondas secundarias o de corte): Estas ondas se desplazan más lentamente que las ondas **P** y sólo pueden propagarse a través de sólidos. Su acción provoca que las partículas se muevan perpendicularmente a la dirección de la onda, generando un movimiento cortante (Figura 1).

*Figura 1: Onda de cuerpo Primaria con velocidad de Onda  $V_p$ , Secundaria con velocidad de Onda  $V_s$*



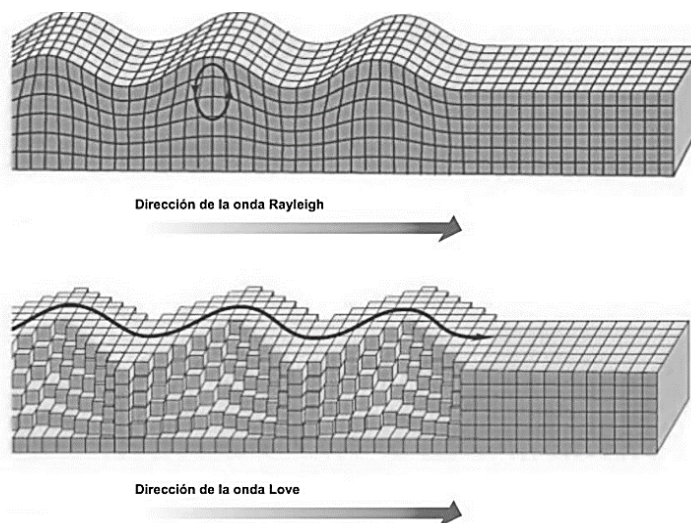
### 2.2.3.5 Ondas superficiales

Son similares a las ondas que se observan en el agua, se extiende a lo largo de la superficie terrestre. Su velocidad es inferior que las ondas de cuerpo, ello debido a su baja frecuencia, tienden a generar resonancia en las edificaciones con mayor facilidad, lo que las convierte en las ondas sísmicas más destructivas. Entre ellas se distinguen dos tipos principales: ondas Rayleigh y ondas Love (Heras Muchica, 2022).

Las ondas Rayleigh, produce un componente de movimiento vertical y horizontal en la dirección de propagación de la onda, asimismo, las ondas

Love, se mueven paralelas a la superficie de la Tierra y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda.

*Figura 2: Ondas superficiales: Rayleigh (VR) y Love (VL)*



#### **2.2.4 Método de refracción sísmica**

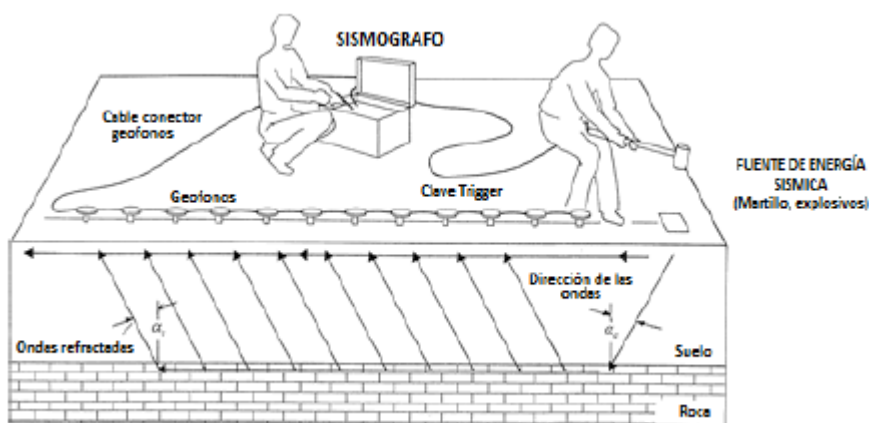
Este método proporciona un medio para estimar la geometría de las principales capas de la corteza terrestre y para medir las velocidades de las ondas elásticas que viajan dentro de estas capas (Maxwell et al. 1971).

Este método se fundamenta en el cálculo de los tiempos de arribo de ondas sísmicas que se refractan en las interfaces de estratos con diferentes velocidades. La energía se genera mediante impactos superficiales, propagándose directamente por el estrato superior y lateralmente por capas más profundas, para ser registrada por geófonos (frecuencia 10 Hz). Al generar impactos en distintas posiciones sobre el terreno, se obtiene información sobre la geometría del estrato refractor profundo, a menudo correspondiente al sustrato rocoso. Definición dada por Prodotti e Apparecchiature Scienze e Industria (P.A.S.I.).

Los registros sísmicos o sismogramas obtenidos mediante una matriz lineal de sensores o geófonos (Figura 3) son almacenadas en una computadora portátil,

para luego ser procesados utilizando el Software Pickwin & Plotrefa, la primera etapa consiste en la estimación precisa de los tiempos de la primera llegada de la señal sísmica para cada registro de disparo, luego se generan gráficas de tiempo – distancia que permiten construir las Dromocronas y sobre ellas obtener las capas de velocidades sísmicas, finalmente se obtienen las secciones geosísmicas o sección de modelo de velocidad del subsuelo basada en una secuencia de capas con velocidades medidas que corresponden a propiedades físicas tales como niveles de compacidad.

*Figura 3: Esquema de Adquisición de Registros Sísmicos por Refracción*



Fuente: IGC , 2011

La energía propagada mediante ondas, es captada, amplificada y registrada de manera que se pueda determinar el tiempo de llegada en cada punto de medición. El inicio de la grabación es controlado por un dispositivo de disparo o trigger, sincronizado con el impacto. La diferencia entre el tiempo de llegada de las ondas y el tiempo inicial permite calcular con precisión el tiempo de propagación desde la fuente sísmica hasta cada uno de los geófonos.

En seguida, se muestra la Tabla 1 con rangos de las velocidades de onda compresional o longitudinales  $V_p$  en suelos y rocas según la norma ASTM-D5777.

*Tabla 1: Valores promedios de ondas compresionales  $V_p$*

| Tipo de suelo                   | Velocidad de ondas $P$<br>$V_p$ (m/s) |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Suelos arenosos                 | 170 – 140                             |
| Suelos con finos                | 300 – 650                             |
| Suelos gruesos                  | 500 – 900                             |
| Suelo intemperizado             | 240 – 610                             |
| Grava o arena                   | 500 – 1500                            |
| Arena mezclada con grava húmeda | 455 – 1065                            |
| Arena y arcilla                 | 300 – 1900                            |
| Arena seca                      | 200 – 1000                            |
| Arena saturada                  | 1500 – 2200                           |
| Arcilla                         | 1000 – 2500                           |
| Aire                            | 330                                   |
| Agua                            | 1450                                  |
| Arenisca                        | 1830 – 3960                           |
| Tobas volcánicas                | 1800-2500                             |
| Suelo de cobertura              | < 1000                                |
| Roca firme                      | > 4000                                |

**Fuente:** Norma ASTM-D5777, Arce Helberg 1990, Martínez V. 1980.

#### **2.2.4.1 Comportamiento sísmico de las ondas $P$**

Hawkins (1961), a las ondas  $P$  se le denominan Ondas Primarias ya que se propagan con mayor velocidad con respecto a otras ondas, viajan a través del suelo de manera similar a las ondas sonoras, su velocidad ( $V_p$ ) depende de las propiedades físicas y del grado de homogeneidad del terreno.

Para analizar los datos obtenidos mediante refracción sísmica, es habitual considerar tanto las imágenes de ondas sísmicas como las trayectorias de los rayos sísmicos. Cuando un determinado rayo encuentra una heterogeneidad, por ejemplo, un contacto litológico con otro material, el rayo incidente se transforma en varios rayos nuevos. Los ángulos que forman el rayo incidente, los rayos reflejados y los rayos refractados con la normal en la superficie de contacto entre los materiales están vinculados entre sí y la velocidad de propagación de unas relaciones conocidas como “leyes de SNELL”.

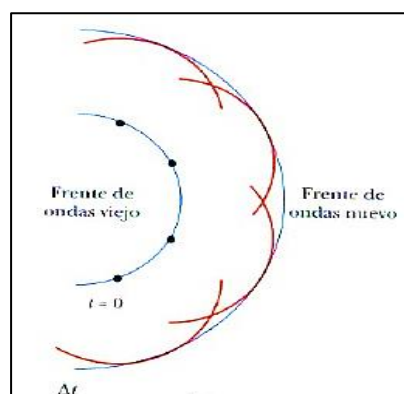
### 2.2.4.2 Propagación y Trayectoria de las Ondas

Las ondas **P**, también llamadas longitudinales, son las de mayor relevancia en el método de refracción sísmica. Su propagación y trayectoria se rigen por principios similares a los de la óptica. Seguidamente, se analizan los conceptos de las leyes de refracción.

#### 2.2.4.2.1 Principio de Huygens

Este principio sostiene que un punto de un determinado frente de onda se comporta como una fuente secundaria que emite nuevas ondas en todas las direcciones. En un medio homogéneo, el frente de onda presenta una forma esférica en un instante determinado  $t$ ; posteriormente, en un tiempo  $t + \Delta t$ , cada uno de estos puntos genera pequeños frentes de onda esféricos con un radio igual a  $V \cdot \Delta t$ , donde  $V$  corresponde a la velocidad de propagación en el medio. El nuevo frente de onda en el instante  $t + \Delta t$  está definido por la envolvente de estos frentes secundarios, manteniendo así una forma esférica y concéntrica respecto al frente inicial. En medios no homogéneos, cada punto del frente de onda se desplaza manteniendo su orientación, pero con velocidades variables a lo largo del mismo, lo que ocasiona que el nuevo frente de onda cambie su geometría y deje de ser paralelo al original (p. ej. Cantos, 1973).

*Figura 4: Frentes de onda y principio de Huygens*



Fuente: Sheriff, R. , 2002.

#### **2.2.4.2.2 Principio de Fermat**

Establece que la trayectoria seguida por un rayo entre dos puntos es aquella que requiere el menor tiempo de recorrido. En este sentido, la dirección de propagación de los rayos se determina de acuerdo con la condición de tiempo mínimo.

Cuando las ondas sísmicas atraviesan medios no homogéneos, como los estratificados, presentan diferentes velocidades; por lo que, los puntos de los rayos sísmicos no siguen trayectorias rectas, sino curvaturas de tiempos menores (p. ej. Cantos, 1973).

#### **2.2.4.2.3 Ley de reflexión**

Este principio indica que cuando un rayo incide sobre la interfaz que separa dos estratos con propiedades distintas, una parte de su energía se refleja. El ángulo que forma el rayo incidente con la normal de la superficie es igual al que forma el rayo reflejado con esa misma normal, ambos contenidos en un mismo plano (Figura 6, Figura 5).

#### **2.2.4.2.4 Ley de refracción**

Este principio indica que cuando un rayo incide sobre la interfaz que separa dos estratos distintos (A y B), además de producirse la reflexión en el estrato A, una parte de la energía se transmite hacia el estrato B en forma de onda refractada. El ángulo de refracción ( $\theta_B$ ) que forma el rayo con la normal depende del ángulo de incidencia ( $\theta_A$ ) y de las velocidades de propagación en ambos medios ( $V_A$  y  $V_B$ ), siguiendo una relación en un mismo plano (Figura 5).



Figura 5: Ley de refracción

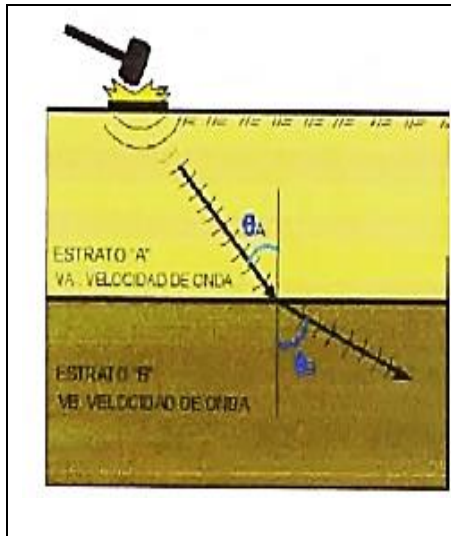
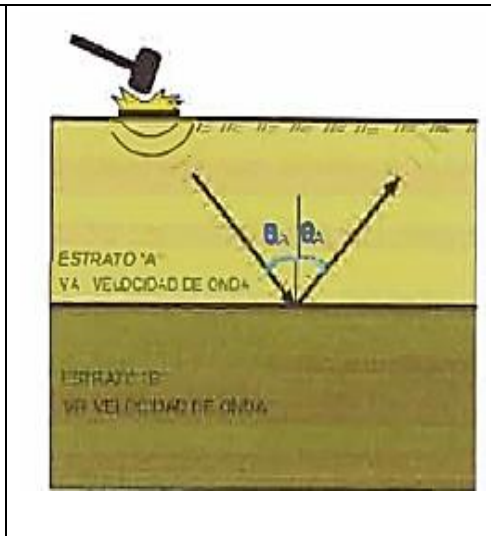


Figura 6: Ley de reflexión



#### 2.2.4.2.5 Ley de Snell:

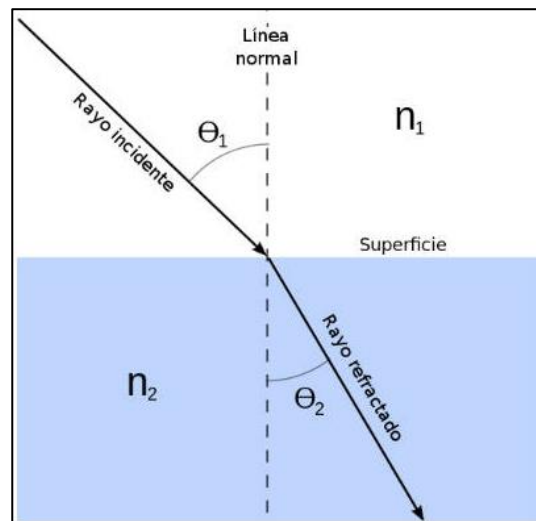
Snell establece que el seno del ángulo de incidencia, dividido por el seno del ángulo de refracción, corresponde a la relación entre la velocidad de la onda incidente dividida por la velocidad de la onda refractada.

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{V_1}{V_2} \dots\dots\dots (1)$$

Al respecto,  $V_1$  y  $V_2$  indican las velocidades de las capas 1 y 2.

Para un ángulo que incide de forma específica, denominado ángulo crítico  $\theta_1$ , el ángulo refractado,  $\theta_2$  se refracta a  $90^\circ$  de la normal, de tal manera que el  $\sin(\theta_2) = \sin(90^\circ) = 1$ . De esta forma, el ángulo crítico queda determinado únicamente por las velocidades de los estratos, donde  $n_1$  y  $n_2$  son índices de medio (Figura 7).

*Figura 7: Ley de refracción Snell*



#### 2.2.4.2.6 Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

El método Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) fue introducido por Park et al. (1999).

Al respecto, Mohammed et al. (2020) indica que el método MASW es el mejor método para definir la velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) para estimar los parámetros de ingeniería y elasticidad,  $V_s$  se calcula analizando las ondas de Rayleigh en registros de señales sísmicas.

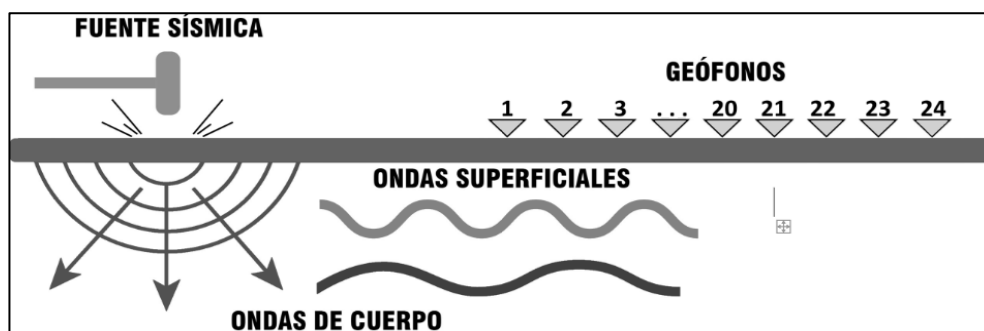
El método MASW, acrónimo de Multi-channel Analysis of Surface Waves (Análisis Multicanal de Ondas de Superficie), se centra en el estudio de la propagación de ondas superficiales, específicamente en la dispersión de estas ondas. La dispersión de las ondas superficiales está influenciada por las variaciones verticales del suelo. A partir de las curvas de dispersión es posible determinar propiedades de los medios, como la velocidad de ondas de corte y el espesor de las capas. Debido al aumento de la velocidad sísmica con la profundidad, las ondas de superficie de baja frecuencia se propagan más rápidamente que las de alta frecuencia. Generalmente, el método MASW se

aplica mediante el análisis de ondas Rayleigh, registradas con geófonos de componente vertical. (P.A.S.I.)

La metodología de la técnica de MASW consiste en generar ondas superficiales con el impacto de una maza hacia la placa (Figura 8), las que son recibidas por los geófonos de frecuencia 4.5Hz y estas son transmitidas al sismógrafo PASI para que los registros sísmicos sean guardados en una computadora portátil y procesados hasta la creación de modelos en 1D de ondas de corte.

La explicación de los datos se realiza obteniendo primero una curva de dispersión. A partir de esta, el perfil de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) se determina mediante un proceso iterativo basado en la inversión no lineal de los datos de dispersión. El método MASW permite construir el perfil de  $V_s$  del suelo utilizando una transformación sencilla, en la que la longitud de onda ( $\lambda$ ) se calcula a partir de la frecuencia ( $f$ ) y la velocidad de fase ( $c$ ). Posteriormente, se representa gráficamente la relación entre la velocidad de ondas de corte (m/s) y la profundidad (m). Es relevante señalar que la forma de la curva de dispersión refleja los cambios de la rigidez del terreno con la profundidad. Por este motivo, el método MASW es capaz de identificar la presencia de estratos menos rígidos intercalados entre capas más rígidas.

*Figura 8: Esquema de adquisición de registros sísmicos por sondeo MASW*



En la Figura 8, se muestran 24 geófonos con igual espaciamiento, la fuente sísmica se encuentra a una distancia de 10% a 20% de la longitud del arreglo.

Este método se ha empleado con creciente frecuencia en estudios geotécnicos para el diseño de cimentaciones en proyectos de ingeniería civil, tales como vías, puentes y túneles, así como en presas de tierra, depósitos de relaves y procesos de lixiviación, etc. Los resultados obtenidos muestran una buena correlación con los perfiles estratigráficos derivados de perforaciones diamantinas y con los datos de Ensayos de Penetración Estándar (SPT), lo que respalda su fiabilidad. Además, representa una alternativa económicamente viable para la estimación de los parámetros dinámicos del suelo de cimentación.

Las principales aplicaciones del método MASW incluyen:

- Identificación de la morfología y espesores de los diferentes estratos del subsuelo.
- Evaluación del grado de densificación y fracturamiento de los insumos.
- Valoración de los módulos elásticos relacionados con la deformación del terreno.
- Determinación de parámetros relevantes para ingeniería y geotecnia.
- Realización de estudios de microzonificación sísmica y clasificación de suelos.
- Cálculo de la velocidad promedio de corte hasta 30 metros de profundidad ( $V_{s30}$ ).
- Caracterización integral del terreno desde los enfoques geológico, geotécnico y geomecánico.

### 2.2.4.3 Determinación de $V_{s30}$

Se ha calculado la velocidad promedio de ondas de corte  $V_{s30}$  corresponde a los  $V_s$  media armónica en todo el depósito de suelo y hasta los primeros 30m, respectivamente, se obtiene mediante la ecuación siguiente (Wang, 2015):

$$\bar{V}_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \dots\dots\dots (2)$$

donde:  $\overline{Vs}$  es promedio de la velocidad de la onda de corte a 30 m de profundidad ( $Vs_{30}$ ),  $di$  es espesor del estrato  $i$ , localizado entre 0 a 30 m superiores del perfil,  $V_{si}$  es velocidad media de la onda de corte del suelo estrato  $i$ , en m/s.

#### 2.2.4.4 Parámetros dinámicos del subsuelo

Para un material elástico lineal que cumple con la ley de Hooke, donde el material tiene las condiciones de homogéneo e isotrópico, linealmente elástico, por lo que es posible determinar los parámetros dinámicos (Kramer, 2006).

Al determinar los resultados de las velocidades de las ondas “P” y “S” ( $V_p$  y  $V_s$ ), se pueden calcular las propiedades elásticas de los diferentes estratos. Entre los más comunes que se obtiene son:

- Módulo de volumen (K) (Incompresibilidad volumétrica).
- Módulo de Young (E)
- Módulo de cizalla (rigidez) (G)
- Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )
- Capacidad de carga.

##### 2.2.4.4.1 Módulo de Young (E)

Cuando las tensiones de compresión o tracción generan deformaciones pequeñas, la dimensión de dichas deformaciones es directamente proporcional a la tensión aplicada, conforme al principio de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

$\sigma$  = tensión

$\varepsilon$  = deformación

En función de ( $V_p$  y  $V_s$ ):

$$E = \rho V_s^2 \left( \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \dots\dots (4)$$

Donde:

$\rho$  = densidad del material del terreno.

#### 2.2.4.4.2 Módulo de rigidez o de cizallamiento ( $G$ )

El esfuerzo cortante se define como la tensión que actúa de manera paralela a una superficie, provocando una deformación por cizallamiento. Esta deformación se expresa mediante el ángulo formado entre la superficie original y la superficie deformada bajo la acción de la tensión paralela.

En función de velocidad  $V_s$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \delta V_s^2 \dots\dots\dots (5)$$

#### 2.2.4.4.3 Primera constante de Lamé ( $\lambda$ )

El comportamiento elástico lineal de un material isotrópico se produce con pequeñas deformaciones y se describe mediante las dos constantes de Lamé, siendo designada la primera de ellas y conocida como ( $\lambda$ ), sobre la segunda constante  $\mu$  es igual al módulo de corte ( $G$ ).

#### 2.2.4.4.4 Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )

Cuando un material se somete a compresión, tiende a acortarse en la dirección de la carga y a alargarse en las direcciones perpendiculares. De manera inversa, si el material se encuentra bajo

tracción, se alarga longitudinalmente y se reduce transversalmente. El coeficiente de Poisson se define como la proporción entre la deformación lateral ( $\varepsilon_a$ ) y la deformación longitudinal ( $\varepsilon_l$ ).

$$\nu = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_l} \dots\dots\dots (6)$$

En relación con las velocidades  $V_p$  y  $V_s$ :

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \dots\dots\dots (7)$$

#### 2.2.4.4.5 Módulo de Bulk (K)

Sobre el particular se conoce como Módulo de compresibilidad, indica la resistencia a la compresión uniforme, se determina mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{\sigma}{\frac{\Delta V}{V_o}} = \frac{E}{3(1-2\nu)} \dots\dots\dots (8)$$

#### 2.2.4.4.6 Relación entre Parámetros Dinámicos del Suelo y Velocidad de Ondas “P” y “S”

Respecto a la velocidad con la que se transmiten las ondas sísmicas cambia según el tipo de suelo, donde las ondas P presentan mayor velocidad. Asimismo, a medida que aumenta la rigidez del terreno, las velocidades de las ondas P y S tienden a acercarse entre sí.

En un lugar homogéneo, la velocidad de propagación de las ondas elásticas está determinada por la densidad de la masa del suelo ( $\rho$ ) y de sus propiedades elásticas, tales como el módulo de elasticidad (E), el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) y el módulo de corte o rigidez (G).

Por lo tanto, la velocidad a la que se propagan las ondas de cuerpos está dada por los módulos elásticos “K” y “G”, que indican la

capacidad cuantitativa de los materiales frente a cambios de volumen y de forma al ser sometidos a esfuerzos. Las velocidades de las ondas están dadas (m/s) por:

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4G}{3}}{\rho}} \dots \dots \dots (9)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \dots \dots \dots (10)$$

$$V_P = \left[ \frac{E}{\rho} \right]^{0.5} \dots \dots \dots (11)$$

La relación que existe entre los parámetros de deformabilidad “E”, el Índice de Poisson “v” y las velocidades de onda “P” y “S” es como sigue:

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-v)}{\rho(1+v)(1-2v)}} \dots \dots \dots (12)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+v)}} \dots \dots \dots (13)$$

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1-v)}{(1-2v)}} \dots \dots \dots (14)$$

A continuación, se presentan las ecuaciones que vinculan las velocidades de ondas P y S, con los parámetros dinámicos, se detallan a continuación:

$$v = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2} \dots \dots \dots (15)$$

$$E = \rho \left[ \frac{(3V_P^2 - 4V_S^2)}{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1} \right] \dots \dots \dots (16)$$



$$K = \rho \left[ V_P^2 - \frac{4V_S^2}{3} \right] \dots \dots \dots (17)$$

$$\lambda = \rho(V_P^2 - 2V_S^2) \dots \dots \dots (18)$$

$$\gamma = 1.51 * 10^{-2} \sqrt{V_P} + 1.3 \dots \dots (19)$$

#### 2.2.4.4.7 Determinación de la capacidad admisible métodos sísmicos

Mediante los métodos sísmicos específicamente MASW y la refracción sísmica, posibilita la determinación de la velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ). Según Tezcan et al. (2006), este parámetro medido en in situ, refleja de manera precisa las condiciones reales del suelo, mostrando mayor confiabilidad que los valores obtenidos mediante ensayos de laboratorio. Asimismo, indica que esta medición constituye una caracterización integral del terreno, ya que incorpora factores como la relación de vacíos, el esfuerzo efectivo de confinar, el historial de esfuerzos, la resistencia a la compresión y al corte, así como la edad geológica, entre otros. En síntesis, con los datos derivada de la velocidad de corte ( $V_s$ ) permite calcular la carga permisible del suelo de manera más eficiente, segura y con menor costo.

Según Tezcan et al. (2009), la capacidad de carga admisible del terreno puede estimarse mediante la siguiente ecuación empírica:

$$q_{adm} = 0.025\gamma V_s \alpha \dots \dots \dots (20)$$

Al respecto:

$q_{adm}$  = Capacidad admisible del suelo

$V_s$  = Velocidad de las ondas sísmicas de corte

$\gamma$ : Densidad natural del suelo

$\alpha$ =Factor de corrección que se aplica únicamente en suelos cuya capacidad depende del ancho del cimiento. La capacidad de carga admisible se expresa en kg/cm<sup>2</sup>. Los valores de  $\alpha$  se tiene en la siguiente tabla (Tezcan, 2009):

*Tabla 2: Factores de corrección ( $\alpha$ ) según ancho de cimiento (B)*

| $\alpha$ , para distintos anchos de cimiento (B) |                                |
|--------------------------------------------------|--------------------------------|
| $\alpha = 1$                                     | $0 \leq B \leq 1.2\text{m}$    |
| $\alpha = 1.13 - 0.11B$                          | $1.2 \leq B \leq 3.0\text{m}$  |
| $\alpha = 0.83 - 0.01B$                          | $3.0 \leq B \leq 12.0\text{m}$ |

#### **2.2.4.4.8 Capacidad de Carga ( $q_a$ )**

Es posible estimar a partir de la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ) obtenida in situ mediante métodos geofísicos. Esta estimación se basa en una relación empírica desarrollada a partir de diversos casos de estudio, que integran información proveniente de sondeos, ensayos de laboratorio y prospección geofísica. La formulación presenta una adecuada concordancia con los resultados derivados de la teoría clásica empleada en el análisis de dicho parámetro (capacidad de carga), donde ha demostrado ser un método confiable y seguro (Tezcan, 2009).

$$q_a = \frac{0.1\rho V_s}{n} \dots \dots \dots (21)$$

Se establecen distintos factores de seguridad en función del tipo de roca o suelo, incorporando además un factor de corrección, relacionado con el ancho de la zapata.

### 2.2.5 Parámetros de diseño de cimentaciones

Toda estructura necesariamente debe descansar sobre el terreno, considerándose este como un componente más dentro del conjunto de materiales que forman la estructura.

No obstante, en comparación con otros insumos estructurales tales como el concreto o el acero, el suelo presenta menor resistencia y mayor deformabilidad, lo que le impide soportar las mismas tensiones. Por ello, las estructuras requieren cimentaciones que transmitan al terreno presiones acordes con su capacidad de carga y capacidad de deformación.

La forma y dimensión de los cimientos dependen tanto de las cargas que deben soportar como de las características del terreno, clasificándose en dos tipos: superficiales o directos, y profundos o indirectos. Se denomina cimentaciones superficiales a los sistemas estructurales encargados de transmitir las cargas al terreno firme que se encuentra a poca profundidad; mientras que cimentaciones profundas, es cuando el terreno donde vamos a apoyar la estructura no es muy resistente.

Según Gonzales L. (2004), el estudio de la cimentación debe al menos considerar las siguientes condiciones:

**Estabilidad:** Contar con un factor de seguridad apropiado.

**Deformaciones permisibles:** Los asentamientos, desplazamientos horizontales y rotaciones generados por la deformación del suelo bajo carga deben ser tolerables para la estructura.

**Compatibilidad con construcciones adyacentes:** La influencia de la cimentación sobre el terreno no se extiendan sobre límites de la estructura proyectada, evitando afectar edificaciones cercanas.

**Durabilidad:** La cimentación debe mantener su funcionalidad y resistencia durante la vida útil de la infraestructura.

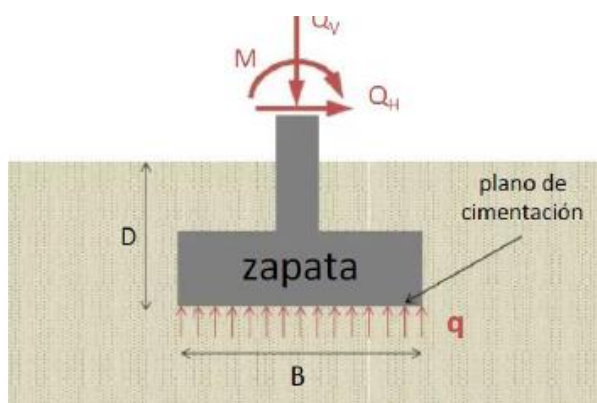
#### 2.2.5.1 Cimentaciones

La cimentación de una estructura es el elemento que la sostiene sobre el terreno. Por lo general, se encuentra en el subsuelo y transmite al suelo tanto

su peso propio como las cargas aplicadas, garantizando que la estructura permanezca estable y que la presión transmitida no supere el límite admisible (Figura 9).

Las cimentaciones superficiales distribuyen las cargas que la estructura les transmite mediante sus elementos de apoyo sobre una amplia superficie del terreno capaz de soportarlas. Se consideran cimentaciones superficiales cuando su profundidad varía entre 0,50m y 4m (Crespo, 2004).

*Figura 9: Cimentación directa con reparto en Plano Horizontal*



Fuente: Modificado de (Crespo, 2004).

## 2.3 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS

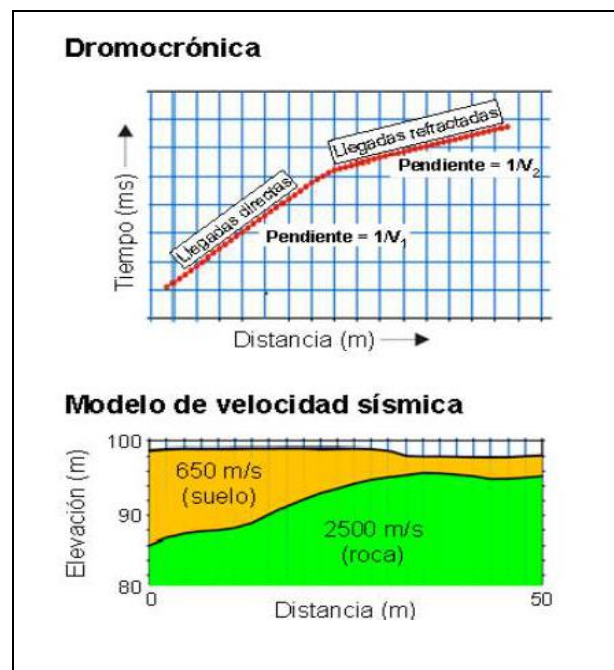
Para entender adecuadamente los resultados obtenidos en estudios de suelos mediante prospección sísmica MASW, es necesario considerar los conceptos relacionados con la teoría de ondas, su clasificación y sus distintas aplicaciones en el campo de la geofísica. La propagación de ondas, independientemente de su tipo (mecánicas, electromagnéticas, entre otras), puede explicarse a partir de los siguientes conceptos fundamentales.

- **Rayo:** Se denomina a la línea imaginaria que indica la dirección de propagación de la luz. Este modelo, ampliamente usado en óptica geométrica, facilita los cálculos al asumir que la luz se desplaza en línea recta en medios homogéneos e isotrópicos, como el aire o el agua.

- Onda: Se define como la propagación de una perturbación y resulta fundamental para comprender diversos fenómenos donde sus propiedades son determinantes, tales como la difracción, la propagación de energía, la interferencia, la polarización y la interacción de las ondas con las características del medio, entre otros.
- Ondas sísmicas: Se consideran ondas sísmicas a pequeñas cantidades de energía elástica que se propagan a través del subsuelo, desplazándose a velocidades determinadas tanto por la densidad del medio como por el módulo de elasticidad del terreno (Lazcano, 2007).
- Reflexión sísmica: Registrar los tiempos de arribo de ondas sísmicas, generadas por fuentes de energía como martillos, explosivos, caída de pesos, hacia los sensores (geófonos), los cuales se disponen de manera alineada a lo largo del perfil de estudio. Las ondas son detectadas después de reflejarse en superficies de contacto entre distintas formaciones rocosas, zonas heterogéneas, fallas y otras discontinuidades geológicas (Gonzales L., 2004).
- Refracción sísmica: Ampliamente empleado en estudios geotécnicos, consiste en generar perfiles longitudinales equipados con sensores (geófonos), colocados a intervalos regulares previamente establecidos (Gonzales L., 2004).
- Muestras inalteradas: Este tipo de muestra no se altera significativamente la estructura del suelo, comprenden estratos bien definidos conservando sus características para evitar cambios de humedad.
- Sismógrafo: El sismógrafo es un instrumento utilizado para medir y registrar las vibraciones de los terremotos, son capaces de registrar la intensidad, dirección y duración del movimiento del suelo en forma digital y, por lo tanto, son compatible con ordenadores digitales.

- Capacidad portante por resistencia: Su evaluación requiere considerar una amplia variedad de factores (Laura, 2016). Los métodos de cálculo dependen de:
  - La configuración de la cimentación.
  - La pendiente del terreno o de la propia cimentación.
  - La geometría y las propiedades mecánicas del suelo.
  - Las condiciones de interacción entre la cimentación y el suelo.
  - Las características de las cargas aplicadas.
  - La influencia del agua presente en el terreno.
- Dromocrónica: Es la información tiempo-distancia, se procesa para conseguir un resultado gráfico que refleja las velocidades de propagación de las ondas y la disposición de los niveles del subsuelo (Figura 10).

*Figura 10: Información tiempo-distancia*



### **3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 HIPÓTESIS**

##### **3.1.1 Hipótesis general**

Es posible determinar la caracterización geotécnica de suelos mediante métodos geofísicos con fines de cimentaciones en la Asociación Neiser - Llacsá en el distrito de Ciudad Nueva -Tacna, 2024.

##### **3.1.2 Hipótesis específicas**

1. Mediante los ensayos de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW-2D) y refracción sísmica permite la caracterización geotécnica del suelo.
2. Los métodos geofísicos proporcionan los valores de ondas Compresionales ( $V_p$ ) y de corte ( $V_s$ ).
3. Es posible calcular los parámetros físicos y mecánicos de los suelos mediante método geofísico para cimentación superficial.
4. Mediante la relación  $V_p/V_s$  y modulo Poisson es posible determinar la calidad del suelo.

#### **3.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

##### **3.2.1 Identificación de variables**

Caracterización Geotécnica.

##### **3.2.2 Dimensiones**

Propiedades físicas.

Propiedades dinámicas.

### 3.2.3 Escala para medición de variables

Parámetros y valores de ondas Compresionales ( $V_p$ ) y de corte ( $V_s$ ), módulo de Poisson, Elasticidad, corte, volumétrico, peso específico, capacidad portante.

*Tabla 3: Operacionalización de Variables*

| Variables                                                                                                                                            | Indicador                                                                                     | Medición                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Variable Independiente</b><br>Análisis de Métodos Geofísicos, con fines de cimentación superficial                                                | Propiedades físicas del suelo, químicas, propiedades mecánicas.                               | Ensayos indirectos: MASW-2D, refracción sísmica.                                                       |
| <b>Variable dependiente</b><br>Beneficios que brinda la Caracterización geotécnica de suelos y diseño de cimentación en la Asociación Neiser Llacsa. | Verificar y comparar los resultados de la respuesta obtenida en la caracterización de suelos. | Resultados, capacidad portante, ángulo de fricción, módulo de rigidez y módulo de elasticidad (Young). |

### 3.3 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es del tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo porque se orienta a obtener valores mediante caracterización de los valores de la capacidad portante de los suelos que garantice una adecuada toma de decisión en las cimentaciones superficiales, tales como muro de contención.

### 3.4 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación es explicativo, según Hernández (2014), los estudios explicativos trascienden la simple descripción de conceptos o fenómenos y la identificación de relaciones entre variables. Su propósito principal es determinar las causas de los eventos o fenómenos, ya sean físicos o sociales, enfocándose en explicar por qué ocurren, en qué condiciones se manifiestan y cómo se relacionan dos o más variables.



### 3.5 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

No experimental, en la presente investigación no se considera variable manipulable ni controlada, se toma muestras de las vías representativas y luego se analiza en el laboratorio las propiedades mecánicas, físicas mediante técnicas de observación y utilizando equipos de laboratorio.

### 3.6 ANALISIS DE IMPACTO

En el presente trabajo aplicada se ha utilizado los métodos geofísicos, con la finalidad de realizar la caracterización de suelo y obtener los resultados dinámicos, dichos resultados son datos que permiten a las entidades públicas promover e impulsar el proceso de planeamiento para el desarrollo local y el ordenamiento territorial a nivel provincial y/o distrital, a través de la formulación de zonificación de espacio físico y uso del suelo así como sobre protección y conservación del medio ambiente.

### 3.7 ÁMBITO Y TIEMPO SOCIAL DEL ESTUDIO

La zona de estudio geofísico se encuentra localizada a pie de ladera del Cerro Intiorko del distrito de Ciudad Nueva, perteneciente a la provincia y región de Tacna, a una altitud aproximada de 733 msnm.

*Figura 11: Ámbito de Estudio y Ubicación de MASW y SST*



Fuente: Elaboración propia.

### **3.8 POBLACIÓN Y MUESTRA**

#### **3.8.1 Unidad de estudio**

#### **3.8.2 Población**

La población de estudio está conformada por la asociación de vivienda Neyser Llacsá y otros del distrito de Ciudad Nueva, Tacna 2024.

La muestra contempla la intersección de calles y vía principal de la asociación de vivienda Neyser Llacsá y otros del distrito de Ciudad Nueva, Tacna 2024. Para ello se realizará un Muestreo no probabilístico de 3 líneas aleatorias, de las vías y zonas más desfavorables.

#### **3.8.3 Muestra**

Se emplearon muestras no probabilísticas, conformadas por 3 sondeos MASW, y 1 LRS de diferentes longitudes.

### **3.9 PROCEDIMIENTO, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS**

#### **3.9.1 Técnicas**

Observación: Mediante la visita de campo y un recorrido por toda el área y vías consideradas en estudio, para plantear la ubicación de las líneas de refracción sísmica (LRS) y MASW y posteriormente ejecutar la exploración geotécnica.

#### **3.9.2 Instrumentos**

- Libretas de campo: se emplearon para registrar el perfil estratigráfico, las propiedades físicas del suelo y la caracterización de la zona de estudio.

- Formatos para registro de datos: se utilizaron para documentar los datos de los ensayos de laboratorio, así como cualquier incidencia o hallazgo relevante durante su realización.
- Equipo de MASW: se utilizaron para la obtención de los principales parámetros de onda del subsuelo.
- Equipo de refracción sísmica: se empleó para realizar ensayos destinados a determinar los parámetros de ondas de corte, Rayleigh.

### **3.9.3 Costo y Sostenibilidad**

El costo y la sostenibilidad en el tiempo está garantizado, ya que los métodos indirectos para la caracterización de suelo se encuentran en las condiciones geotécnicas y análisis sísmico. Los parámetros, y la clasificación de perfiles de suelo, se establecen en la norma técnica.

## **4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS**

### **4.1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO**

#### **4.1.1 Procedimiento**

##### **4.1.1.1 Refracción sísmica**

En relación a los trabajos de campo, se dio inicio con la identificación de los puntos de inicio y final en el terreno, con el objetivo de la ejecución de la Refracción sísmica para el presente estudio, dicha actividad se ejecutó en el año del 2024, con el soporte de 01 personal capacitado en los ensayos y 2 ayudantes. En esta fase de estudio, el profesional técnico y equipo de trabajo identifican la ubicación de los ensayos según el programa de trabajo y realiza la adquisición de datos con el equipo sísmico.

Para ejecutar los ensayos, inicialmente se procede a tender la wincha métrica de 100m de longitud sobre la línea replanteada en superficie, en seguida se realiza el tendido de cables sísmicos y la distribución de 24 geófonos en los puntos marcados en la línea a intervalos de 5m para Refracción Sísmica. Los geófonos se instalaron en el terreno clavados de forma perpendicular al suelo y en contacto fijo para garantizar la calidad de datos, en la figura presenta el diseño de instalación utilizado, el cual permite registrar la velocidad de ondas compresionales ( $V_p$ ).

Se tomaron 5 registros por cada tendido de refracción para mejorar la obtención e interpretación que se ve afectada por causa de ruido generado por el flujo vehicular de la zona, tránsito peatonal y otros, asimismo, se ejecutó dos tracks por registro para mejorar la precisión de los mismos. El número de disparos permitió a realizar una mejor interpretación y obtener mejor calidad de los perfiles de suelo.

Finalmente, se obtienen los datos sísmicos, para ello se inicia el sismógrafo para su respectiva configuración de parámetros de adquisición, y mediante un controlador se registran las ondas generadas por la fuente activa (Shots – golpes de impacto al suelo).

#### 4.1.1.1.1 Ubicación de ensayos geofísicos

Para la realización de la línea de refracción sísmica (LRS-01) de 115 metros lineales, se ubican a lo largo de la calle Intiorko cuadra 01 hasta cuadra 03. La ubicación geográfica se presenta en las siguientes tablas:

*Tabla 4: Ubicación geográfica de Refracción Sísmica*

| COORDENADAS UTM - WGS84, ZONA 19K |        |         |        |         |                 |
|-----------------------------------|--------|---------|--------|---------|-----------------|
| LÍNEA                             | INICIO |         | FINAL  |         | LONGITUD<br>(m) |
|                                   | ESTE   | NORTE   | ESTE   | NORTE   |                 |
| LRS-01                            | 369712 | 8012486 | 369617 | 8012420 | 115             |

#### 4.1.1.1.2 Equipos de Refracción Sísmica

Para el desarrollo de las actividades de prospección sísmica en campo se ha empleado el siguiente Instrumental:

- Sismógrafo GEA24 P.A.S.I. de 24 canales (Figura 12).
- 24 geófonos verticales de 4.5 Hz y 10 Hz.
- Un Martillo de 20 libras – maza de impacto.
- 02 cables sísmicos de espaciamiento 5m.
- Cable alargador Trigger.
- 02 platos de impacto de alta y baja frecuencia.
- 01 GPS.
- 01 cámara fotográfica.
- 01 laptop.
- Equipos de comunicación.

El equipo GEA24, se trata de un sismógrafo compacto de 24 canales, equipado con una tarjeta de adquisición de 24 bits e interfaz USB, se basa en la medición del tiempo de llegada de las ondas sísmicas de compresión y cizallamiento en la superficie terrestre, generadas mediante las técnicas de

Sísmica Pasiva que registra la vibración ambiental en sitio de estudio y sísmica Activa que registran señales generadas artificialmente.

*Figura 12: Instrumental de equipo Sísmica – Sismógrafo GEA24 PASI de 24 canales*



La fuente de energía utilizada para la refracción sísmica es un martillo de 20lb y un plato metálico, el impacto producido es de forma manual, y por lo que, la profundidad de exploración puede ser limitada.

#### **4.1.1.1.3 Ventajas y desventajas de la Refracción sísmica**

Al ser un método no invasivo, permite interpretar las características del suelo, mediante el análisis de variación de velocidades de onda ( $V_p$ ), presenta ciertas ventajas y desventajas, tal como se detalle en el siguiente (Cantos, 1987):

##### **Ventajas**

- ✓ Utiliza menos Geófonos y menor fuente de generación.
- ✓ Solo requiere tiempo de llegada de la onda P, por lo que, su procesamiento de datos es muy rápido.
- ✓ Se trata de un método de bajo costo para el proyectista y que permite abarcar áreas extensas.

- ✓ Permite realizar una prospección de estratos a poca profundidad en el terreno, algo que resulta complicado de lograr mediante métodos de reflexión.

#### **Desventajas**

- ✓ Solo es aplicable cuando la velocidad aumenta con la profundidad.
- ✓ Limitantes derivadas de la física de propagación de las ondas, como la inversión de velocidad, en capa delgada, el solapamiento de ondas cónicas.
- ✓ Está limitada a profundidades de 100m y a 3-4 estratos principales; en capas más profundas, las diferencias de velocidad dificultan su identificación en las dromocrónicas.
- ✓ Existen restricciones en la resolución asociadas a la atenuación acelerada de las ondas de corta longitud de onda. Para identificar capas más profundas, es necesario utilizar tendidos de mayor extensión.

#### **4.1.1.1.4 Aplicación de las líneas sísmicas en el área de estudio**

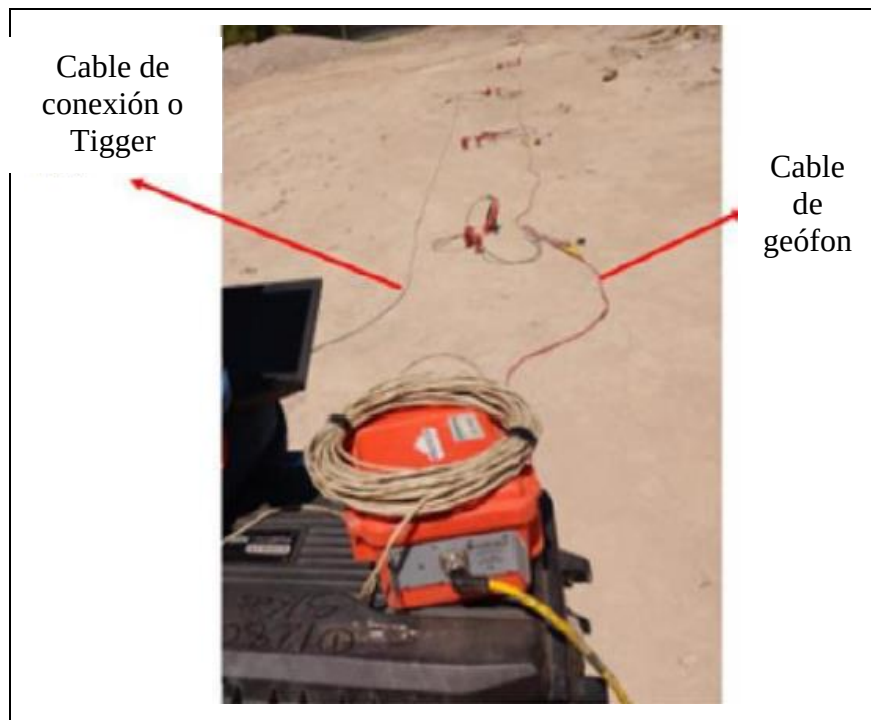
Línea Sísmica N°1 (LRS-01), ubicada en la calle Intiorko según Figura 11, para la adquisición de recolección de datos se procedió de manera siguiente:

- Se trazan las líneas de estudio sobre el terreno de acuerdo a la ubicación y se remueve la vegetación para facilitar el traslado del equipo, los cables y detectores.
- Se instalan estacas en los puntos donde se ubicarán los detectores y las fuentes (Fotografía 1).
- Se realiza el levantamiento topográfico de las líneas sísmicas, en caso de no contar con uno adecuado a partir de los mapas.
- Se procede con el tendido del cable de detectores correspondiente al primer arreglo de la línea sísmica.
- Proceder con el clavado de los detectores (geófonos) en el terreno. Posteriormente, estos se conectan al cable que transmite la señal hacia el sismógrafo.

- El cable de los geófonos es conectado al sismógrafo.
- A continuación, se revisa desde el sismógrafo que todos los geófonos estén conectados y que estén funcionando adecuadamente. Verifica el nivel de ruido ambiental.
- Proceder con la configuración el equipo.
- Se coloca la fuente en donde se realizará el golpe.
- Se ajustan las amplitudes de cada traza registrada con el fin de facilitar la posterior identificación de los tiempos de arribo inicial de las ondas.
- Las trazas se almacenan en un registro permanente.
- Seguidamente, se elimina el registro de la memoria del sismógrafo.
- Se realiza el otro golpe en el siguiente punto de generación sísmica del tendido, repitiéndose de manera similar el proceso de registro y almacenamiento de datos.
- Se procede al traslado del cable de detectores y del sismógrafo hacia la ubicación de la siguiente prueba. Los detectores se retiran de su posición inicial y se reinstalan en los puntos de recepción del nuevo tendido, repitiendo el mismo procedimiento realizado en el primer tendido. Esta secuencia se ejecuta de manera similar a los tendidos y líneas subsecuentes.
- El cable de la extensión del disipador o trigger se extiende en forma paralelo al tendido de los 24 geófonos. Para evitar cruces con el cable de los geófonos, es recomendable ubicar este cable en el lado opuesto de la línea de geófonos, tal como se ilustra en la Fotografía 1.
- Luego, se debe conectar a un equipo o computadora personal para el correspondiente registro de datos.



*Fotografía 1: Disposición de geófonos para línea de refracción sísmica*



#### **4.1.1.2 Procesamiento MASW**

El procesamiento se basa en la dispersión de las ondas de corte, tratándose de un método de alta resolución que utiliza ondas superficiales y que no depende de la longitud del tendido. El almacenamiento de datos se realizó con 24 canales, manteniendo constante la disposición de la fuente y receptores, los cuales se desplazaron de manera sucesiva a distancias predeterminadas a lo largo de la línea establecida. Los datos registrados se transforman al dominio frecuencia-velocidad de fase para analizar la dispersión, y posteriormente se aplica un proceso de inversión con el objetivo de generar perfiles unidimensionales (1D) de velocidades ( $V_s$ ). Todos los perfiles 1D se interpolan según las coordenadas del punto medio común (CMP) del spread utilizado durante la adquisición de los datos. Posteriormente, mediante interpolación espacial, se genera un mapa bidimensional (2D) del área de estudio (Bowles, 1979).

Debido a su considerable resolución tanto vertical y horizontal, este método ofrece información precisa sobre la rigidez del terreno, dado que la velocidad de la onda S es un indicador directo de esta propiedad.

Además, permite estimar parámetros de deformación dinámica del suelo, como el módulo de corte (G) y el módulo elástico dinámico (E).

#### 4.1.1.2.1 Ubicación de ensayo MASW

La ejecución de las 03 líneas sísmica (MASW), se ubican a lo largo de la calle intiorko cuadra 01 hasta 03 en forma lineal, el MASW-01 se ubica en la parte intermedia de LRS-01. La ubicación geográfica se presenta en las siguientes tablas:

*Tabla 5: Ubicación geográfica de sondeos MASW*

| <b>COORDENADAS UTM - WGS84, ZONA 19K</b> |                           |              |
|------------------------------------------|---------------------------|--------------|
| <b>SONDEO</b>                            | <b>COORDENADA PUNTUAL</b> |              |
|                                          | <b>ESTE</b>               | <b>NORTE</b> |
| MASW-01                                  | 369669                    | 8012456      |
| MASW-02                                  | 369727                    | 8012498      |
| MASW-03                                  | 369526                    | 8012357      |

#### 4.1.1.2.2 Equipos de MASW

Para ejecutar los ensayos MASW, se contó con equipos de prospección geofísica; sismógrafo de 24 canales, tan cómo se detalla a continuación (Fotografía 2).

- Sismógrafo digital GEA24 P.A.S.I. de 24 canales (Figura 12).
- 24 geófonos verticales de 4.5 Hz y 10 Hz.
- 24 trípodes para geófonos de acero inoxidable
- Un Martillo de 20 libras – maza de impacto.
- 02 cables sísmicos de espaciamiento 2.5m.
- Cable alargador Trigger.
- 02 platos de impacto de alta y baja frecuencia.

- 01 GPS.
- 01 cámara fotográfica.
- 01 laptop.
- Equipos de comunicación.

*Fotografía 2: Disposición de geófonos para línea sísmica MASW*



## **4.2 DISEÑO DE LA PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS**

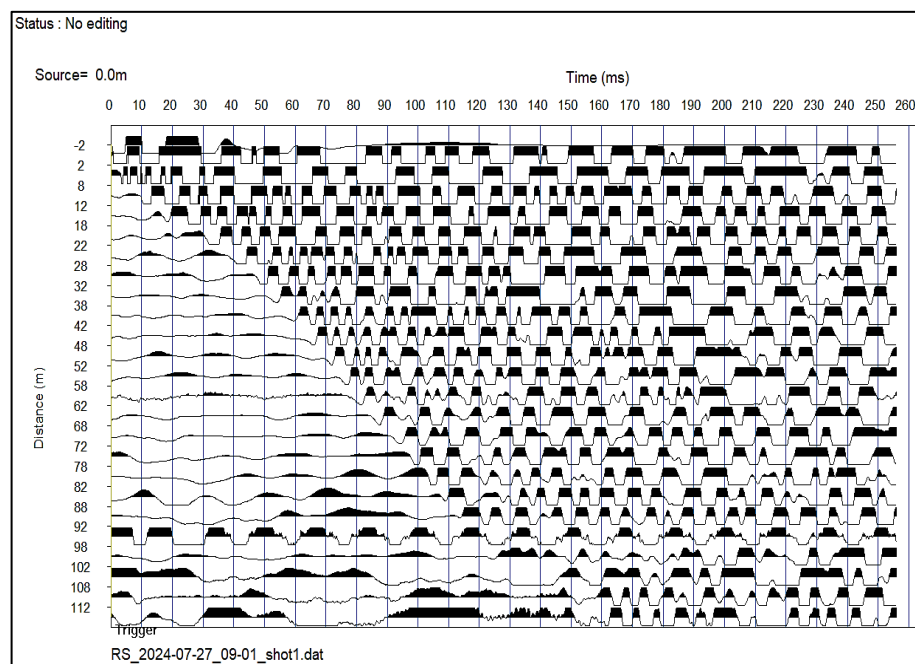
### **4.2.1 Procesamiento Refracción Sísmica**

La data obtenida de campo es procesada con el Software SeisImagen/2D, que permite identificar los primeros arribos de ondas P en un Sismograma (Figura 15), además, permite generar Dromocronas (Figura 17). El otro programa complementario de SeisImager/2D es Plotrefa, que permite trazar velocidades y definir las capas necesarias sobre la Dromocronas, también permite generar el modelo inicial (Figura 18) mediante el método recíproco generalizado (GRM) para luego ser aplicado el método de

inversión tomográfica, finalmente se visualiza el perfil bidimensional de velocidad de las ondas sísmicas primarias en escala de colores con valores de velocidad de ondas P (Figura 19).

A continuación (Figura 13), se muestra la vista de registro de LRS-1, donde se visualiza las primeras ondas P, provocadas y generadas por la fuente de energía superficial ubicada en el primer extremo del esquema, es decir las primeras ondas refractadas que llegan a los geófonos (sensor), donde nos permitirá a determinar la velocidad de las ondas P.

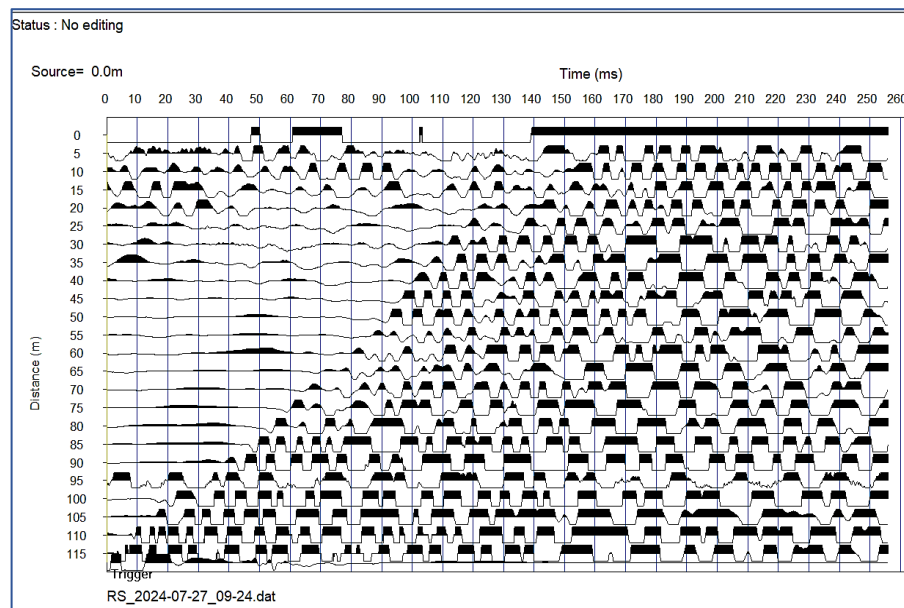
*Figura 13: Línea de refracción sísmica alejado a la fuente.*



En la Figura 14 se observa que, los geófonos más alejados al shots (disparos), recepcionan en mayor tiempo de arribo de la onda refractada, donde se tiene el primer arribo de las ondas P.

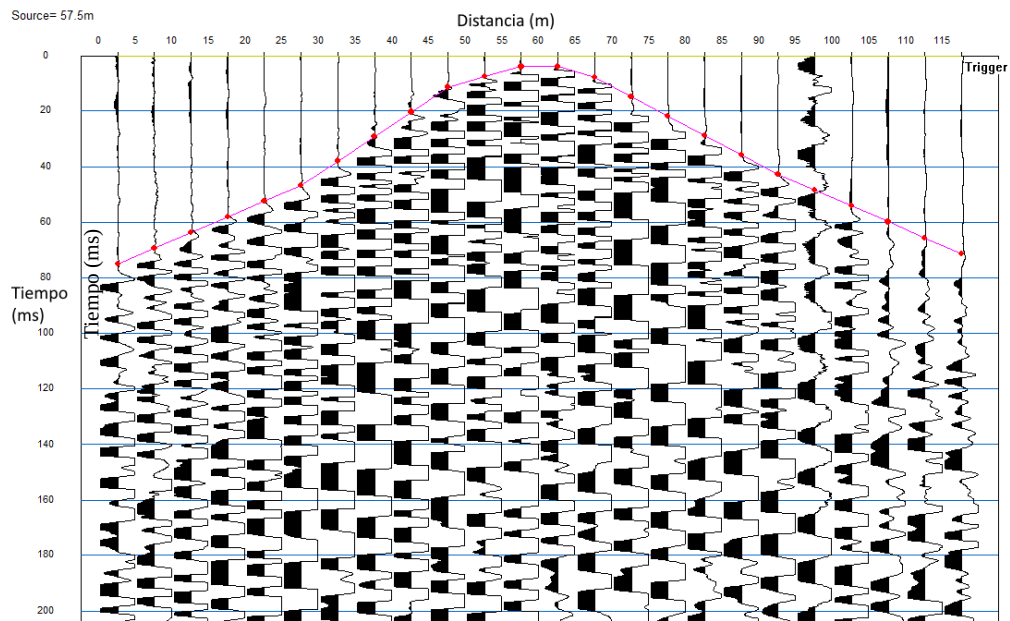
Asimismo, se observa que, los geófonos más cercanos al shot (disparo), recepcionan en menor tiempo el arribo de la onda refractada, es decir el arribo de las ondas P, el tiempo de llegada será necesario para determinar la velocidad de dicha onda.

*Figura 14: Línea de refracción sísmica cercano a la fuente*



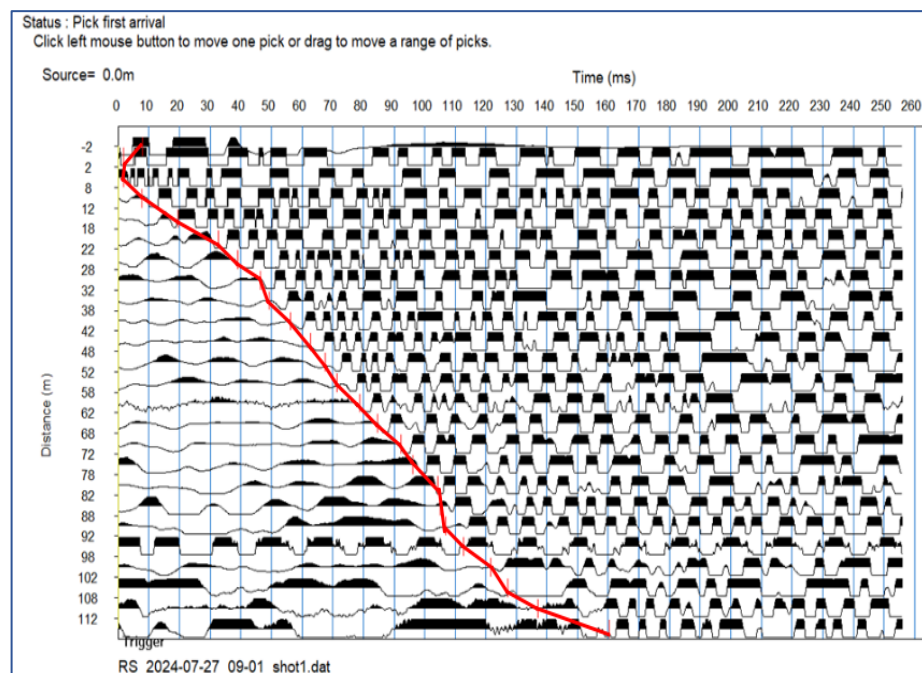
En la Figura 15, se tiene los resultados de los registros sísmicos y cómo se obtuvo la lectura de los tiempos. Los puntos rojos representan a los primeros arribos de ondas P, las cuales se han identificado en 5 sismogramas, generadas con 5 Shots (Disparos) con apilamiento de 2 a 3 veces. Con las cuales se generan las dromocrónicas a medida que se registran los tiempos de llegada en cada archivo, las lecturas se acumulan para conformar un archivo final, que se almacena y se utiliza en el siguiente paso del proceso.

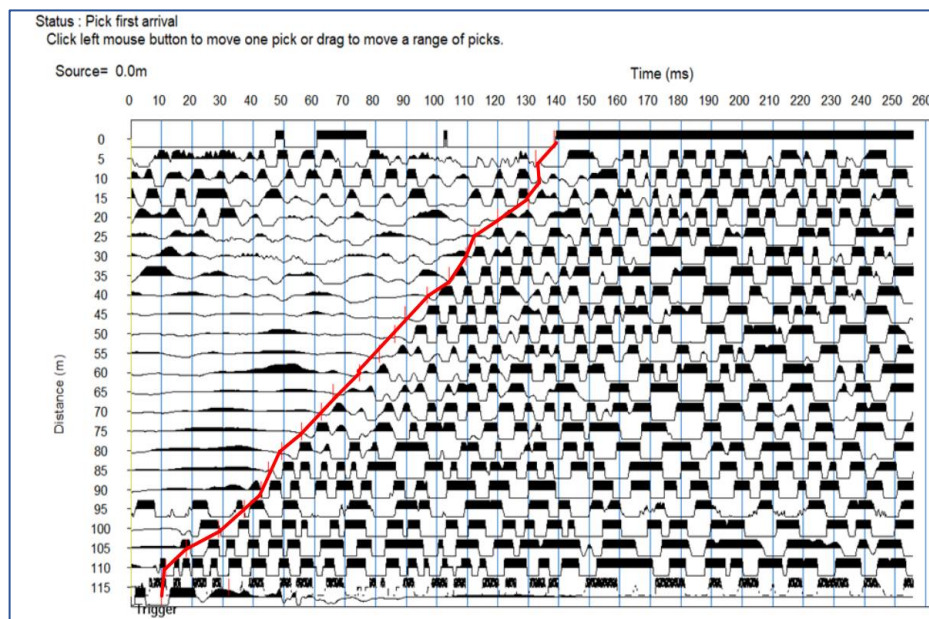
*Figura 15: Sismograma de la Línea de Refracción Sísmica LRS-01*



Posteriormente, en los registros sísmicos se debe realizar la identificación y picado del arribo de las ondas P, (Pinkwin) para los diferentes Shots ubicadas a lo largo de la línea de refracción sísmica. En la Figura 16, se tiene la unión de dichos puntos, dichos trabajos se realizan en gabinete:

*Figura 16: Picado del arribo de las Ondas P*





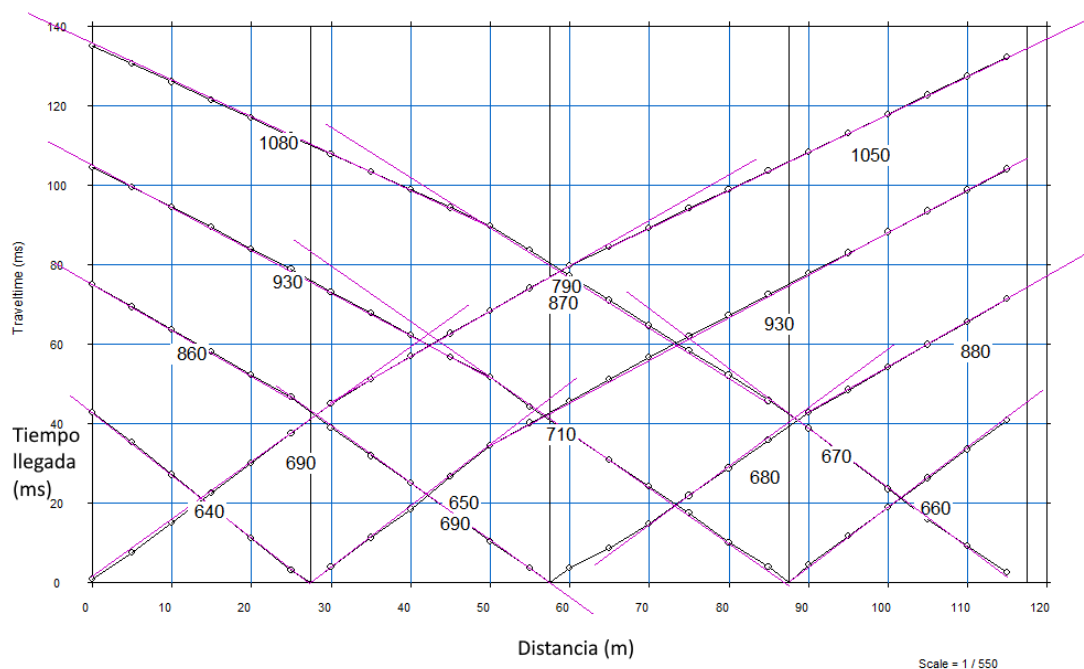
Luego de la adquisición de data en campo, y de procesamiento en gabinete (Figura 16), se considera tres etapas, registrar el inicio de las ondas y los tiempos de la primera llegada de la onda P, a cada uno de los geófonos de los registros realizados, lo que nos permitirá a determinar la rigidez de los materiales, para ello se debe integrar todas las mediciones registradas por los geófonos, de los diferentes registros sísmicos.

En la siguiente Figura 17, se muestra la sumatoria de todos los registros realizados se obtiene las dromocrónicas con asignación de velocidades y capas para su posterior interpretación mediante el método recíproco generalizado, así como se observa en la siguiente imagen o gráfico.

El archivo con la selección de tiempos obtenidos en el módulo Pickwin, se importa al módulo Plotrefa para elaborar la gráfica Tiempo-Distancia denominado Domocrona, se construye representando el tiempo de llegada de la onda P en función de la distancia de los geófonos en referencia al punto de disparo, posteriormente se debe ajustar las mediciones y obtener las pendientes (velocidades) a fin de obtener perfiles de subsuelo.



Figura 17: Dromocrona de la Línea de Refracción Sísmica LRS-01



La Figura 18, es el modelo de refracción sísmica resultante, el estrato geosísmico superior de color rosado representa a las velocidades  $V_p$  igual a 740 m/s; la capa intermedia tiene  $V_p$  igual a 860 m/s; la capa inferior tiene un espesor indefinido, sin embargo, se le asigna una velocidad de 940 m/s en el contacto con la capa intermedia. Finalmente, se obtiene un modelo de refracción sísmica más realista con el método de inversión tomográfica con la aplicación al modelo inicial obtenido, como se aprecia en la siguiente gráfica.

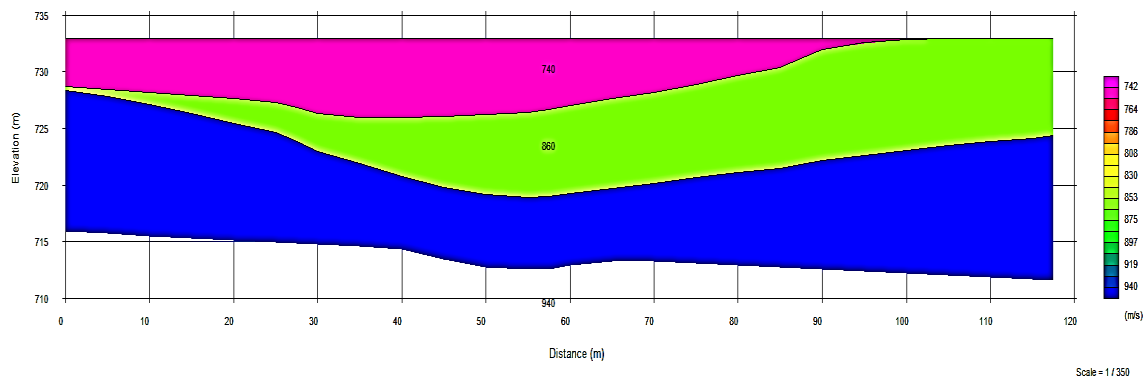
Por lo tanto, el primer estrato superficial presenta velocidades de ondas compresionales de  $V_p=740$  m/s, y un espesor que varía entre 1.0 m a 3.5 m, el cual está compuesto por suelo producto de la intemperización con arenas poco compactas.

El siguiente estrato muestra valores de  $V_p$  entre 860 m/s a 910 m/s, con un espesor variable entre 3.5 m a 12.0 m, constituido por un suelo de grava o arena seca de compactación media. Finalmente, un tercer estrato registra velocidades  $V_p$  entre 910 m/s a 940 m/s correspondiente al mismo material



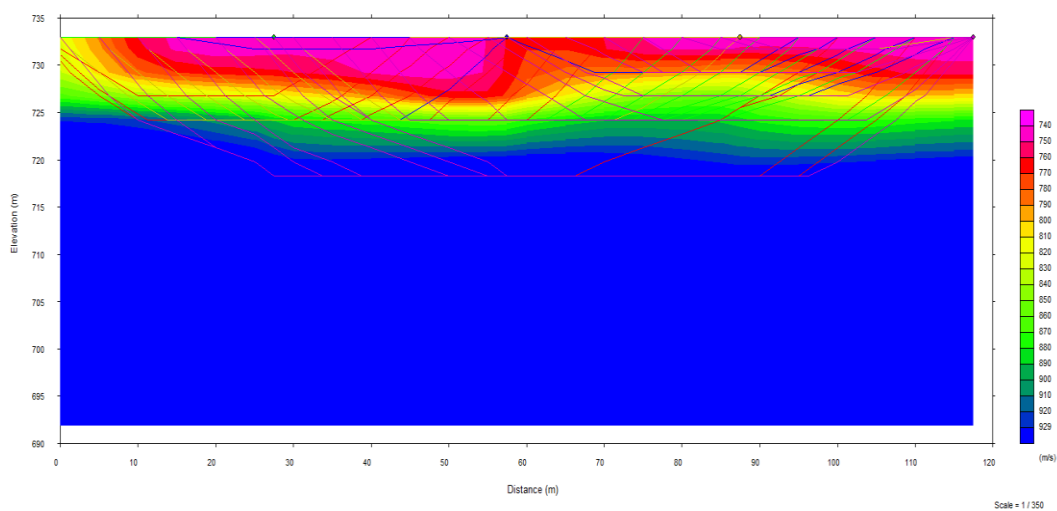
del estrato anterior, pero con mayor densidad y compactación; su espesor no ha sido determinado.

*Figura 18: Modelo inicial de Refracción Sísmica LRS-01*



En la Figura 19, las líneas representan la trayectoria de rayos de cada frente de ondas, se aprecia claramente que hay hasta 5 capas refractoras hasta los 15 metros de profundidad, para observar capas más profundas se requiere mayor longitud de tendido del cable sísmico, mayores intervalos entre geófonos y energía suficiente.

*Figura 19: Perfil Tomográfico de Refracción Sísmica LRS-01*



#### 4.2.2 Procesamiento MASW

Los registros sísmicos obtenidos en campo se procesan con el programa Seisimager/SW, obteniéndose un perfil unidimensional de velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ). El método MASW permite obtener perfiles de ondas S hasta profundidades en promedio de 30m o más en condiciones geológicas y topográficas adecuadas.

La explicación de los registros permite obtener curvas de dispersión, tal como se muestra en la Figura 21 -espectro de velocidades. El perfil de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) se obtiene mediante un proceso iterativo que implica la inversión no lineal de los datos extraídos de la curva de dispersión.

En consecuencia (Foti, 2014), el método MASW permite estimar el perfil de velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) del suelo utilizando la curva de dispersión mediante una simple transformación, que estima que la longitud de onda ( $\lambda$ ) se calcula a partir de la frecuencia ( $f$ ) y la velocidad de fase ( $c$ ), cómo se indica en la ecuación 21. Posteriormente, la profundidad ( $D$ ) se determina entre  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{1}{3}$  de la longitud de onda, y la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) a esa profundidad se obtiene multiplicando la velocidad de fase  $c$  por un factor  $b$ , el cual varía según la frecuencia y se basa en el supuesto de un semiespacio homogéneo. En la Figura 22, muestra la relación entre la Velocidad de Onda de Corte (m/s) y Profundidad (m) que representa a perfil unidimensional del MASW.

$$\lambda = \frac{c}{f} \dots \dots \dots (21)$$

$$D = \frac{\lambda}{3} \dots \dots \dots (22)$$

$$V_s = b * c \dots \dots \dots (23)$$

Donde:

|           |                          |
|-----------|--------------------------|
| $\lambda$ | : Longitud de onda       |
| c         | : Velocidad de fase      |
| f         | : Frecuencia             |
| D         | : Profundidad            |
| $V_s$     | : Velocidad de la onda S |

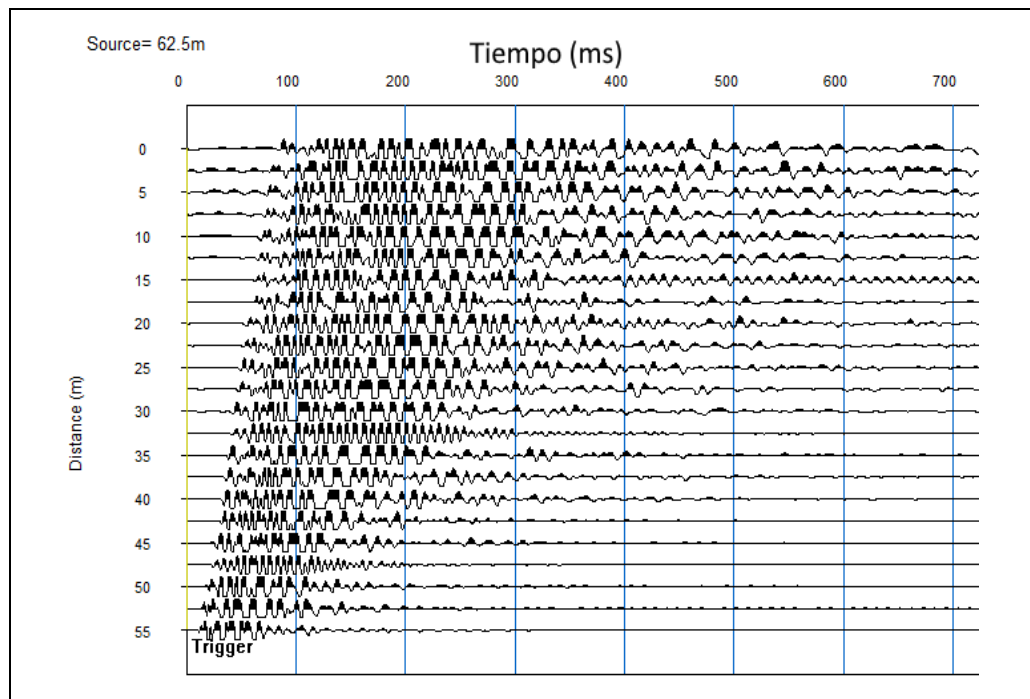
donde b varía de 1.05 a 1.11

Cabe precisar que la morfología de la curva de dispersión se encuentra estrechamente vinculada con cambios en la rigidez del terreno y la profundidad. En consecuencia, el método MASW permite identificar estratos más rígidos superpuestos a capas de menor rigidez.

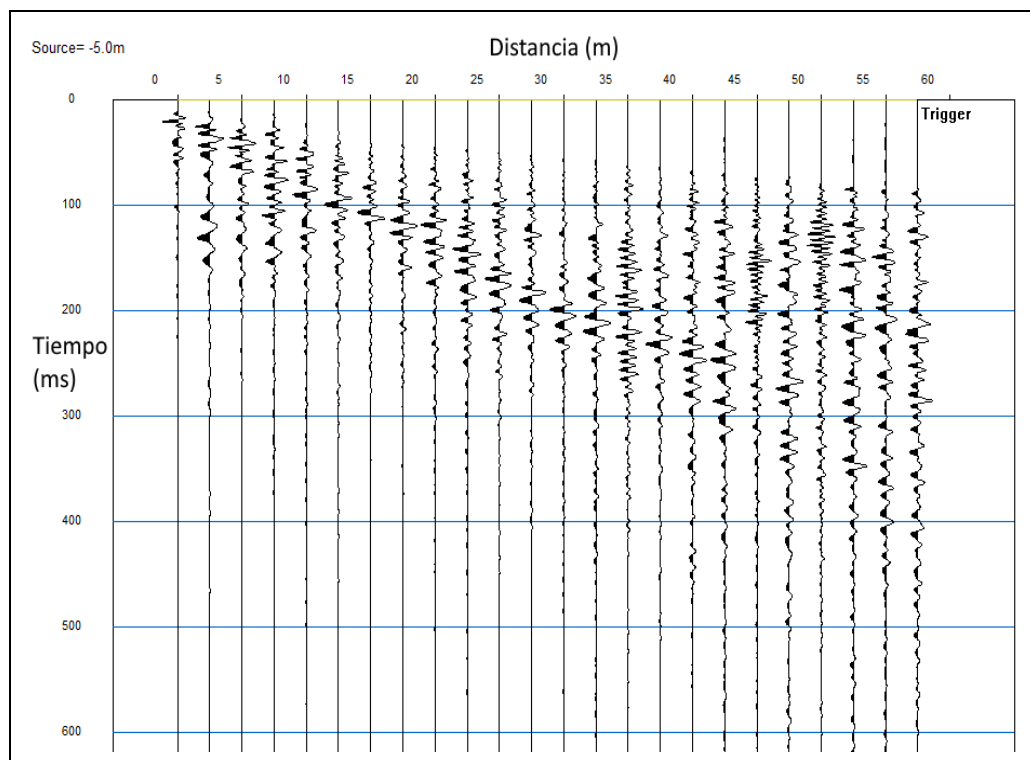
En la primera etapa de procesamiento de datos y utilizando el software SeisImagen/2D, en el módulo PickWin se seleccionan los datos obtenidos en campo, posteriormente se debe definir los parámetros necesarios para generar la curva de dispersión en el menú de Pickwin, seleccione Análisis de ondas superficiales (S), opción Transformación de velocidad de fase - frecuencia; en seguida se realiza el picado de la velocidad de fase mediante el método de semblanza, tal como se ilustra en la Figura 17.

Asimismo, en la Figura 20, se muestran las ondas de dispersión obtenidas, para cada MASW donde se obtuvo 03 registros sísmicos multicanales, representadas bidimensionalmente en coordenadas de distancia y tiempo. En la Figura 20 a) MASW-01, en el eje de las abscisas se tiene la velocidad de ondas de corte y en las ordenadas se tiene la distancia en metros, donde se encuentra los 24 geófonos separados a 2.5m. Del mismo modo en la Figura 20 b) MASW-02, es posible intercambiar los datos en los ejes, es decir se tiene en el eje de las abscisas la distancia donde se encuentra distribuido los geófonos.

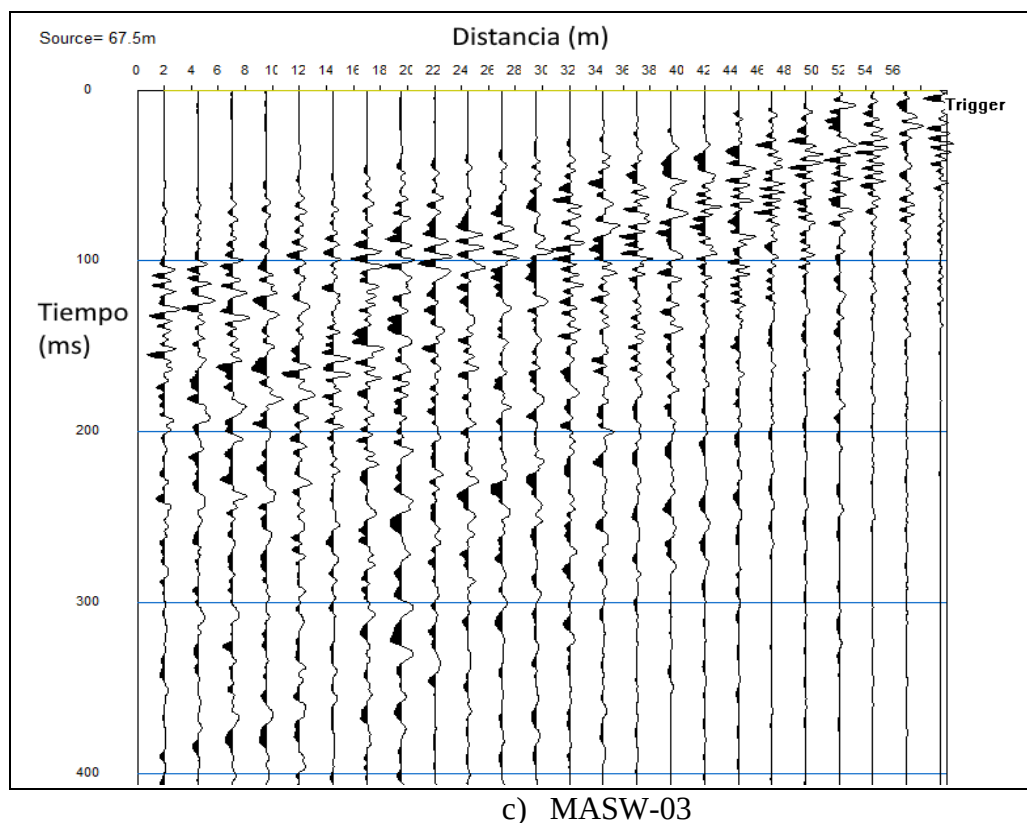
Figura 20: *Dispersión de Ondas Rayleigh de MASW-01, MASW-02 y MASW-03*



a) MASW-01



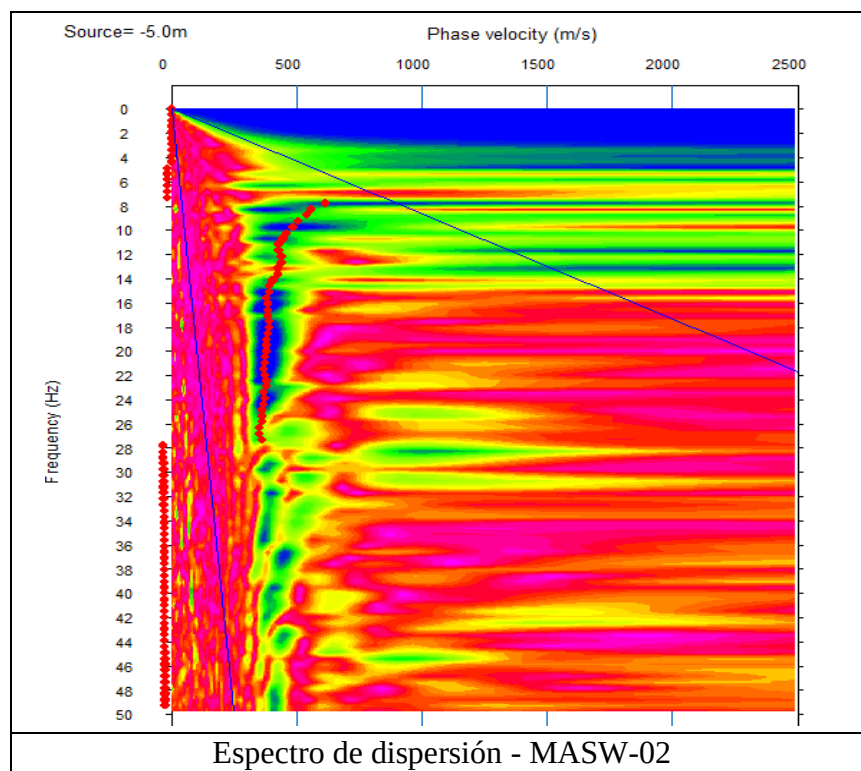
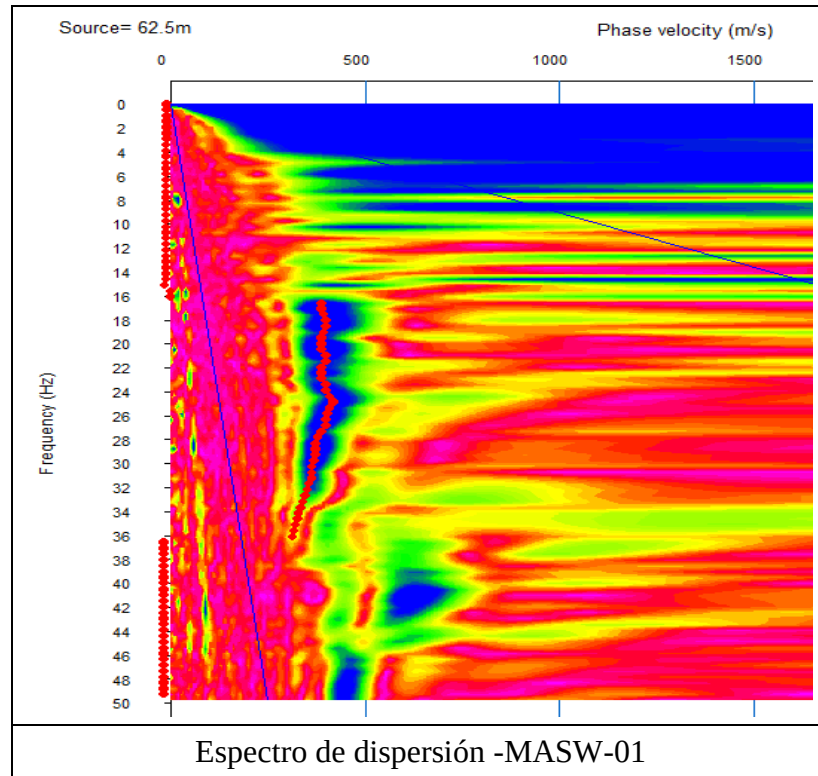
b) MASW-02

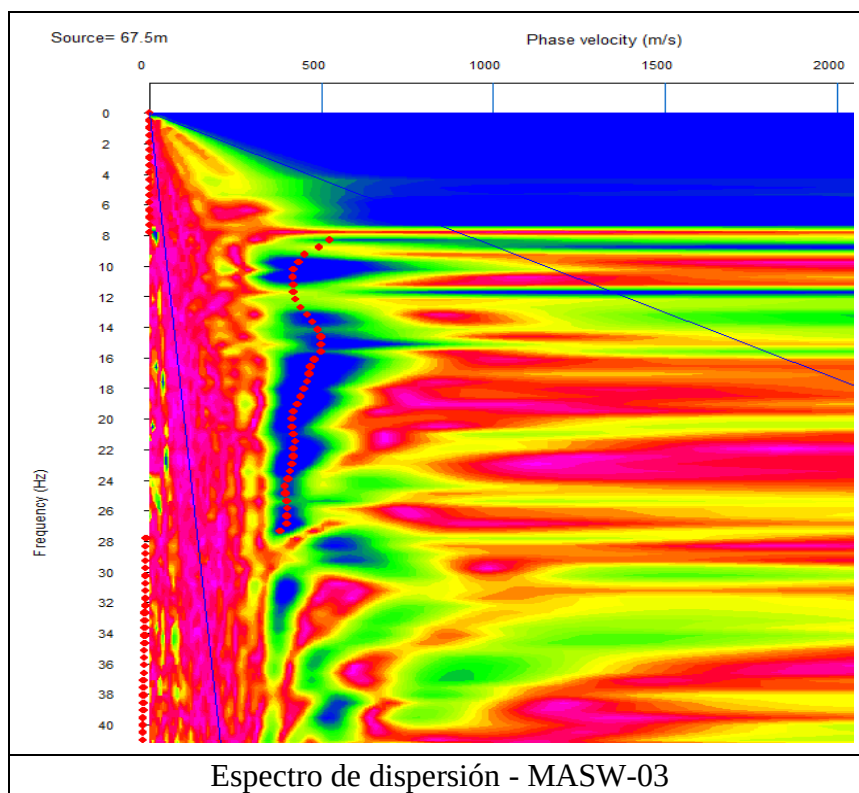


En los espectros de velocidades y frecuencias que se muestra en la Figura 21, se observan las curvas de dispersión representadas con puntos de color rojo y es posible la corrección en esta etapa, para cada MASW se obtuvo 4 curvas y se han promediado para obtener una sola, en cada una de las figuras se puede observar el picado de los máximos espectrales, con la finalidad de obtener un modelo unidimensional de MASW 1D, a través de un proceso de inversión de datos.

Finalmente, se genera el modelo inicial y mediante la inversión se obtienen los perfiles unidimensionales que se muestran a continuación.

Figura 21: Espectro de Velocidades y Curvas de Dispersión de MASW-01, MASW-02, MASW-03

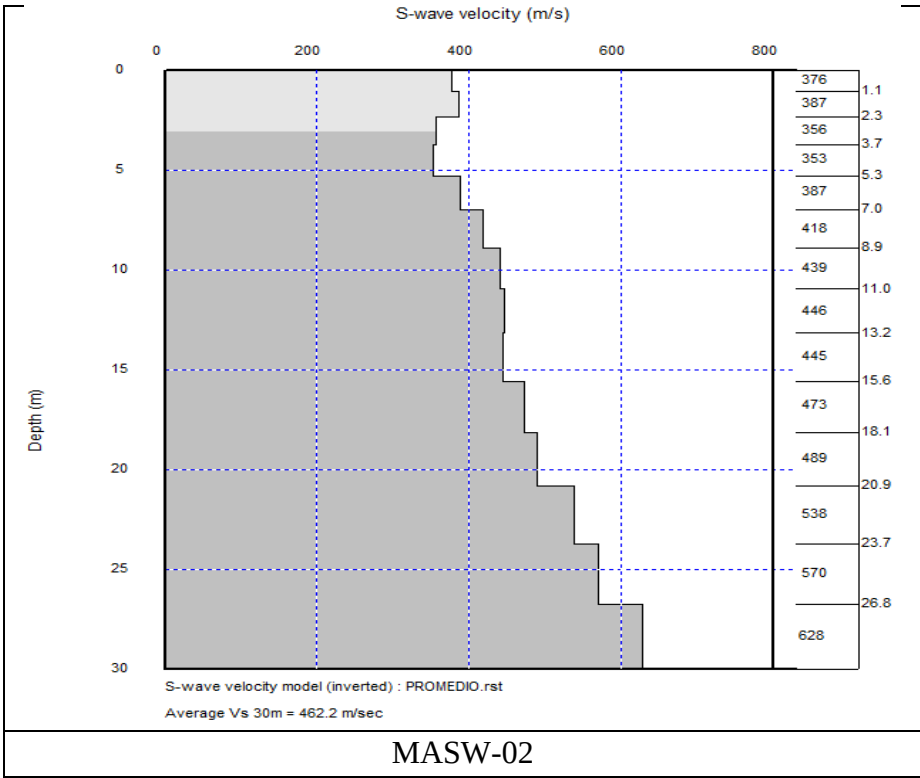
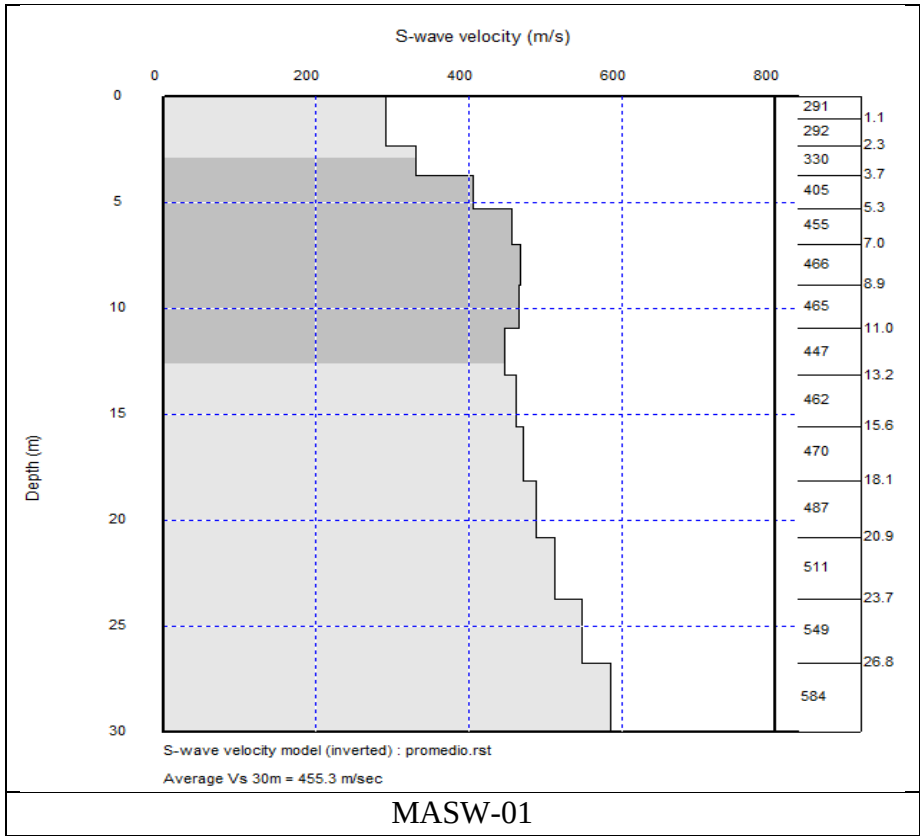




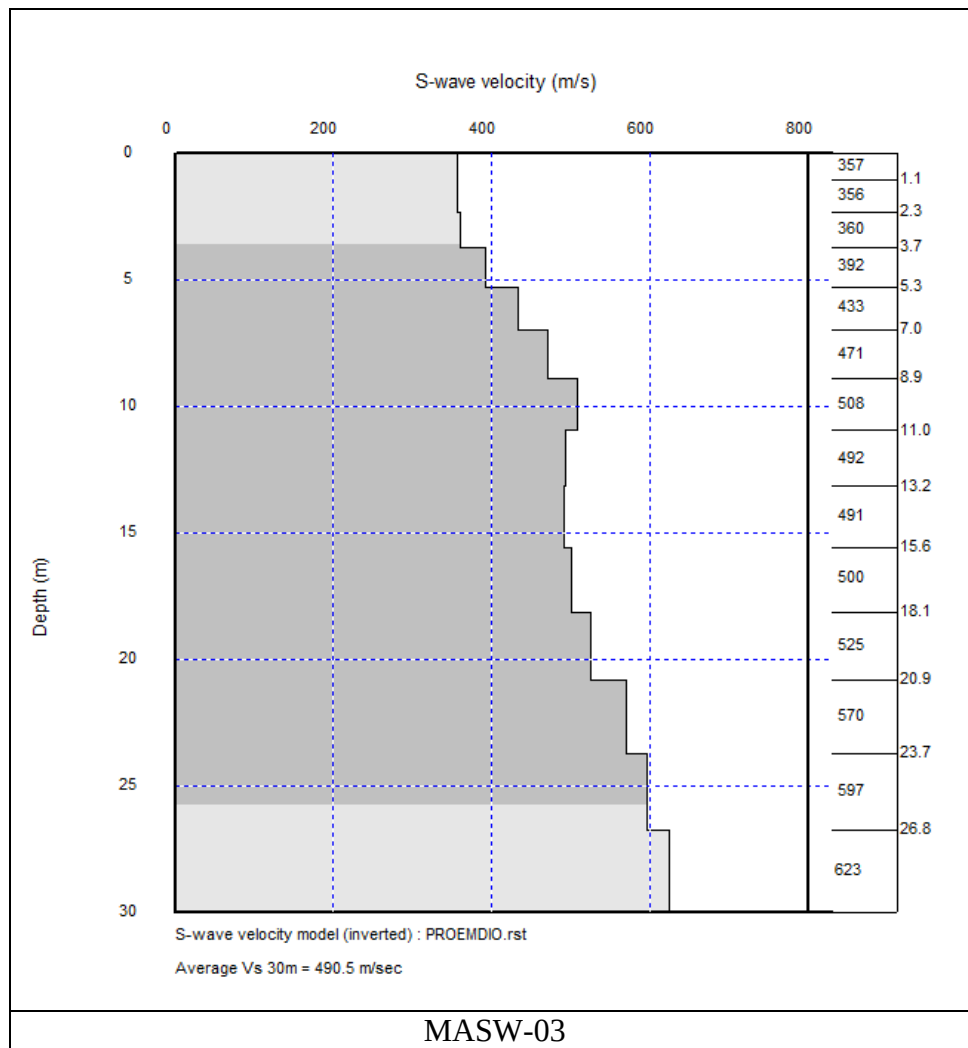
En la Figura 22, se muestran el modelo unidimensional generado con los datos obtenidos del campo y de la curva de dispersión ajustada de los sondeos MASW, además se tiene 03 modelos, en las abscisas están las Velocidades  $V_s$  y en las ordenadas la profundidad de hasta los 30m, según lo planificado. Asimismo, se puede ver el perfil unidimensional de velocidades de ondas superficiales de tres regiones dos regiones de color gris clara y otra de color gris oscura.

Cada registro corresponde a cuatro fuentes de la misma cantidad de Shots, y se obtiene un solo modelo representativo unidimensional. En cada uno de los modelos de capas se obtiene, la velocidad promedio  $V_{s30}$ .

Figura 22: Perfil Unidimensional de MASW-01, MASW-02 y MASW-03





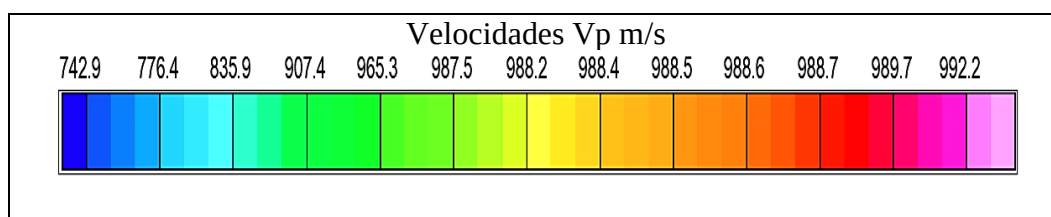


## 4.3 RESULTADOS

### 4.3.1 Interpretación del Perfil de Refracción Sísmica

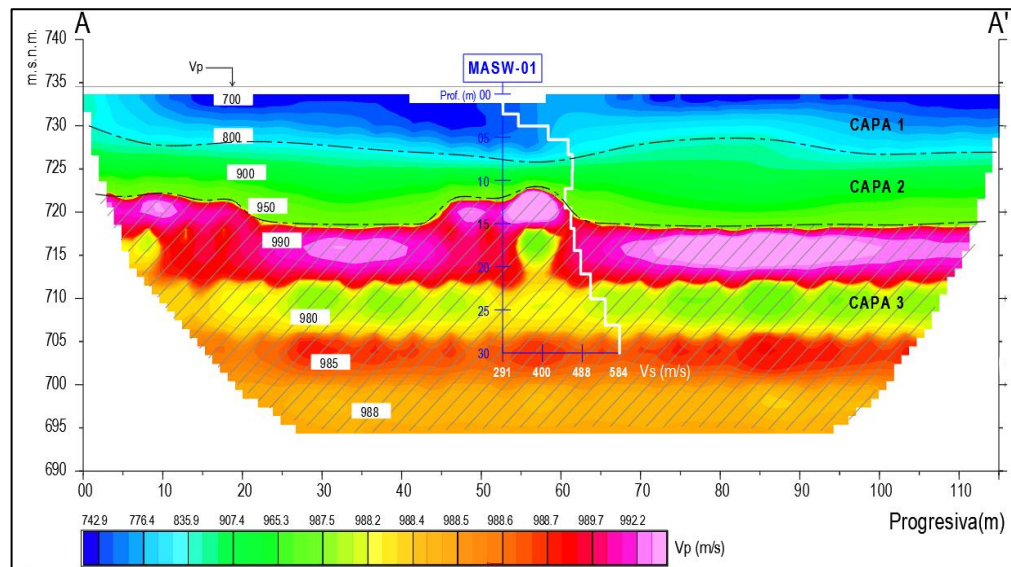
Se ha diferenciado una gama de velocidades que se muestra en la Figura 23, cada rango de colores representa a un estrato geosísmica de velocidades de ondas P ( $V_p$ ) en m/s, por consiguiente, el perfil sísmico tendrá la escala de velocidades agrupados en tres estratos o capas geosísmicos.

*Figura 23: Rango de  $V_p$  obtenidas para el perfil de Refracción Sísmica LRS-01*



El perfil LRS-01 o sección A-A' se sitúa sobre la capa sub superficial de un pavimento en proceso de construcción, tiene una longitud de 115 m lineales y 15 metros de profundidad de investigación aproximada al basamento rígido, se ha definido en tres estratos geosísmicos (capa 1, capa 2, capa 3) como se muestra en la (Figura 24) y se describe en la Tabla 6, la interpretación geosísmica según rango de las velocidades  $V_p$  que representa. En la parte intermedia de perfil se ubica el sondeo MASW-01 que representa a las velocidades de ondas de corte  $V_s$  (Figura 24).

*Figura 24: Perfil de Refracción Sísmica LRS-01*



*Tabla 6: Interpretación del perfil sísmico LRS-01*

| Estrato | Vp<br>(m/s) | Espesor<br>(m) | Litología Geosísmica                                                                                                                           |
|---------|-------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | 700 a 830   | 03 a 05        | Estrato superior, las velocidades Vp representan a depósitos tecnógenos, conformados de material granular de compacidad media.                 |
| 2       | 800 a 988   | 05 a 10        | Estrato intermedio, se asocia a depósito coluvial de arena limosa de compacidad media a densa.                                                 |
| 3       | > 988       | $\infty$       | Estrato inferior, representa a depósito coluvial con bloques y cantos rodados de tobas volcánicas con matriz arena limosa de compacidad densa. |

Depósitos Tecnógenos, según (Blamires, 2022) son áreas cubiertas con obras civiles y urbanas contemporáneas realizadas por el hombre en ambiente geológico

y geomorfológico. En este caso está conformada por la estructura del pavimento en construcción (capas de suelos seleccionados y compactados).

#### 4.3.2 Interpretación MASW

En la interpretación de los ensayos MASW se consideran los criterios establecidos en las normas técnicas E.030 de Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones y el IBC - 2021 de clasificación sísmica de suelos, en función a las velocidades de propagación de ondas de corte en los 30m superficiales ( $V_{s30}$ ), según la Tabla 7 y Tabla 8, se identifican los estratos geosísmicos y su clasificación sísmica de suelos.

*Tabla 7. Clasificación de suelos según la Norma Técnica Peruana E.030*

| <b>CLASIFICACIÓN SÍSMICA DE SUELOS SEGÚN NORMA (E. 030)</b> |                                                                                      |                           |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| <b>TIPO</b>                                                 | <b><math>V_s</math> 30(m/s)</b>                                                      | <b>Descripción</b>        |
| <b>S0</b>                                                   | >1500m/s                                                                             | Roca Dura                 |
| <b>S1</b>                                                   | 500 - 1500                                                                           | Roca o suelos muy rígidos |
| <b>S2</b>                                                   | 180 - 500                                                                            | suelos intermedios        |
| <b>S3</b>                                                   | < 180                                                                                | suelo blando              |
| <b>S4</b>                                                   | Suelos especiales (licuables, colapsables, arcillas muy plásticas, suelos orgánicos) |                           |

*Tabla 8: Clasificación de suelos según IBC-2021*

| <b>CLASIFICACIÓN SÍSMICA DE SUELOS (IBC-2021)</b> |                                 |                    |
|---------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| <b>TIPO</b>                                       | <b><math>V_s</math> 30(m/s)</b> | <b>Descripción</b> |
| <b>A</b>                                          | > 1524                          | Roca dura          |

| <b>CLASIFICACIÓN SÍSMICA DE SUELOS (IBC-2021)</b> |                   |                                          |
|---------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------|
| <b>TIPO</b>                                       | <b>Vs 30(m/s)</b> | <b>Descripción</b>                       |
| <b>B</b>                                          | > 914 a 1524      | Roca de dureza media                     |
| <b>BC</b>                                         | > 640 a 914       | Roca blanda                              |
| <b>C</b>                                          | > 442 a 640       | Arena muy densa o arcilla dura           |
| <b>CD</b>                                         | > 305 a 442       | Arena densa o arcilla muy rígida         |
| <b>D</b>                                          | > 213 a 305       | Arena de densidad media o arcilla rígida |
| <b>DE</b>                                         | > 152 a 213       | Arena suelta o arcilla de rigidez media  |
| <b>E</b>                                          | < = 152           | Arena muy suelta o arcilla blanda        |

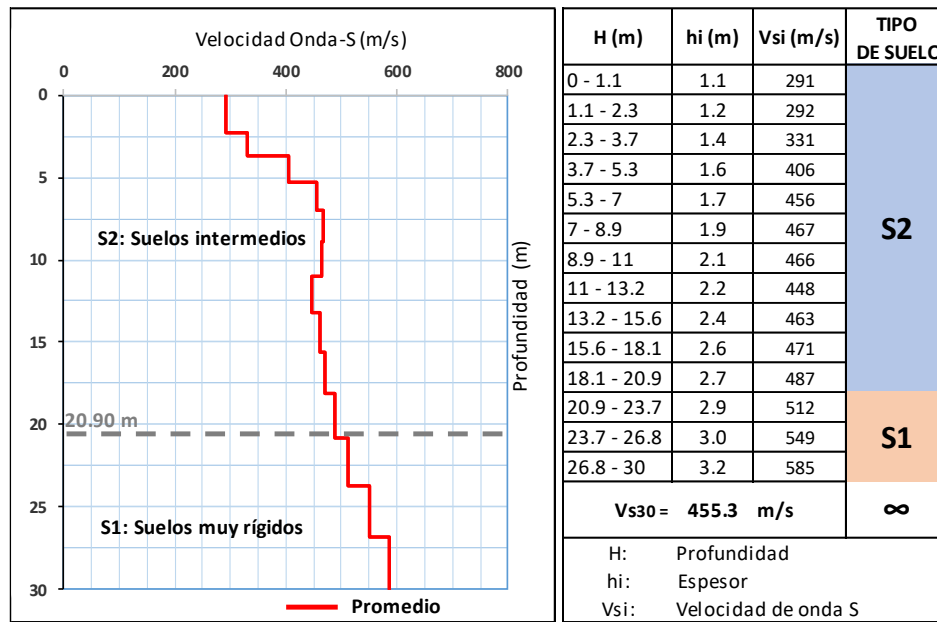
#### 4.3.2.1 Sondaje MASW-01

En la Figura 25, se visualiza el modelo unidimensional y los resultados de MASW-01, se interpreta lo siguiente:

El ensayo causó un sondaje de velocidades de ondas de corte S, con valores entre 291 y 585 m/s, clasificándose en dos estratos sísmicos de tipo S2 y S1 según norma E.030, con resultados esperados hasta una profundidad de 20m en la parte intermedia de la línea de refracción sísmica LRS-01. El estrato de color azul (S2) se asocia a suelos granulares de compacidad media y en profundidad a suelo de arena limosa de compacidad media a densa; el estrato de color naranjado (S1) representa suelo de compacidad densa o muy rígida.

El valor de Vs30 del terreno es 455.3 m/s, por tanto, según la norma IBC-2021 se clasifica como suelo tipo C y según norma E.030 de tipo S2.

Figura 25: Modelo unidimensional y resultados MASW-01



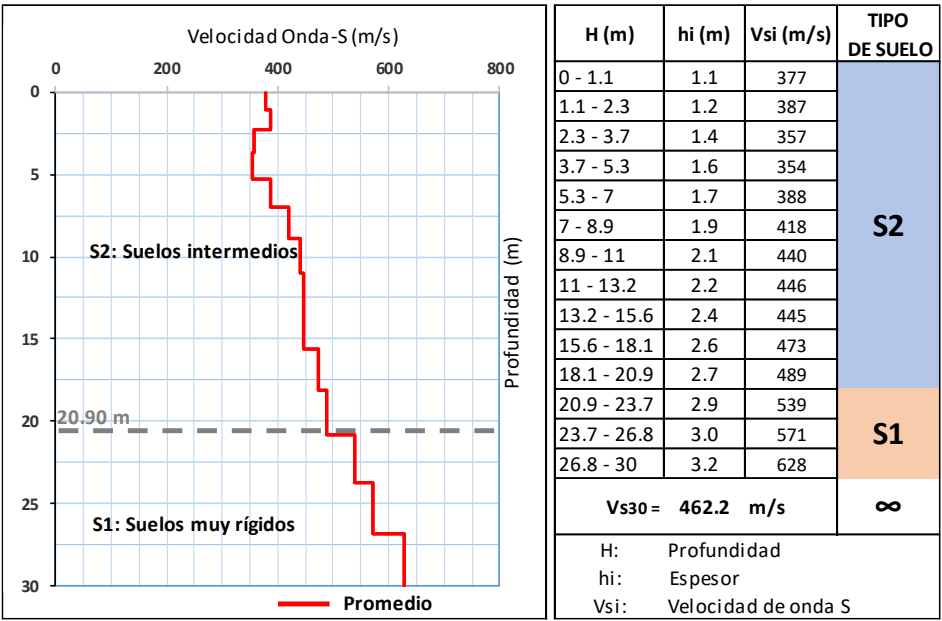
#### 4.3.2.2 Sondaje MASW-02

En la Figura 26, se muestra el resultado de MASW-02 y se interpreta lo siguiente:

El ensayo generó un sondaje de velocidades de ondas de corte S que varían entre 377 y 628 m/s, se clasifica en dos estratos sísmicos de tipo S2 y S1 según norma E.030, con resultados válidos hasta una profundidad de 30 metros. Suelo de tipo S2 se asocia a suelos arenosos de compacidad media en superficie y medianamente densa en profundidad, S1 representa suelos densos o muy rígidos.

El valor de Vs30 de terreno es 462.2 m/s, por tanto, según la norma IBC-2021 se clasifica como suelo tipo C y según norma E.030 de tipo S2.

Figura 26: Modelo unidimensional y resultados MASW-02



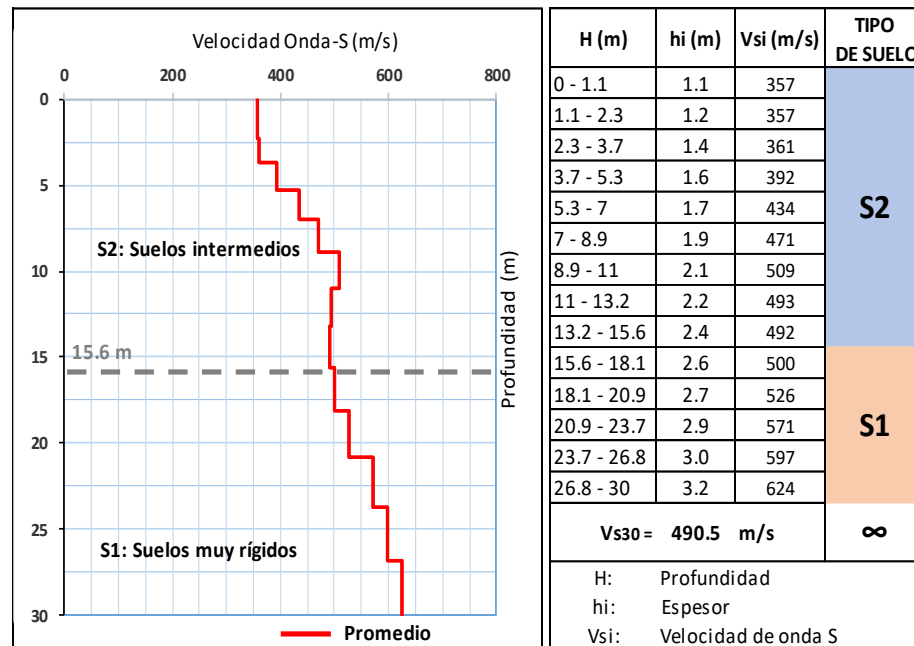
4.3.2.3 Sondaje MASW-03

En la Figura 27, se muestra el resultado de MASW-03 y es posible indicar lo siguiente:

El ensayo generó un sondaje de velocidades de ondas de corte S que están entre 357 y 624 m/s, se clasifica en dos estratos sísmicos de tipo **S2** y **S1** según norma E.030, con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m. Suelo de tipo S2 se asocia a suelo granular de compactación media en superficie y medianamente densa en profundidad, S1 representa suelos densos o muy rígidos.

El valor de Vs30 de terreno es 490.5 m/s, por tanto, según la norma IBC-2021 se clasifica como suelo tipo C y según norma E.030 de tipo S2.

Figura 27: Modelo unidimensional y resultados MASW-03



### 4.3.3 Correlaciones Cuantitativas

Las correlaciones mediante regresiones lineales entre las velocidades de onda P y onda S, con respecto a las variables geotécnicas tales como: ángulo de fricción ( $\phi$ ), módulo de poisson ( $\nu$ ), cohesión ( $c$ ), densidad ( $\gamma$ ), capacidad admisible y capacidad portante, se analizan las relaciones entre dichos parámetros.

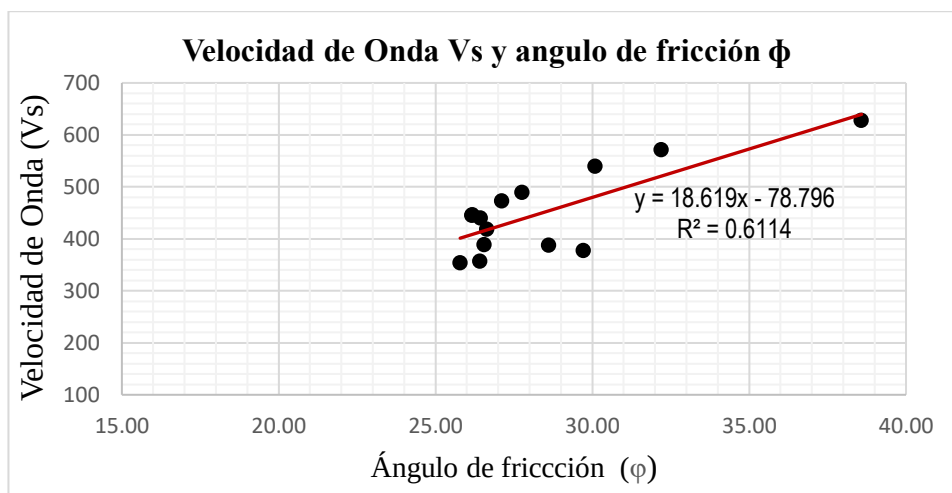
#### 4.3.3.1 Relación entre Velocidad de onda y ángulo de fricción ( $\phi$ )

Este parámetro de suelos, es fundamental y depende directamente de la densidad, forma y tamaño de las partículas y finalmente se traducirá en la capacidad portante del suelo.

Según la Figura 28, en términos generales para ángulos de fricción  $25^\circ$  y  $30^\circ$  corresponde velocidades entre 387m/s y 480m/s, se observa una correlación (61.14%) positiva entre Vs y  $\phi$ , esto explica el incremento en la densidad, asimismo el contacto entre las partículas se incrementa simultáneamente la rigidez y la resistencia al corte y la estabilidad del mismo.



Figura 28: Correlación entre la velocidad de onda S y ángulo de fricción  $\phi$ .

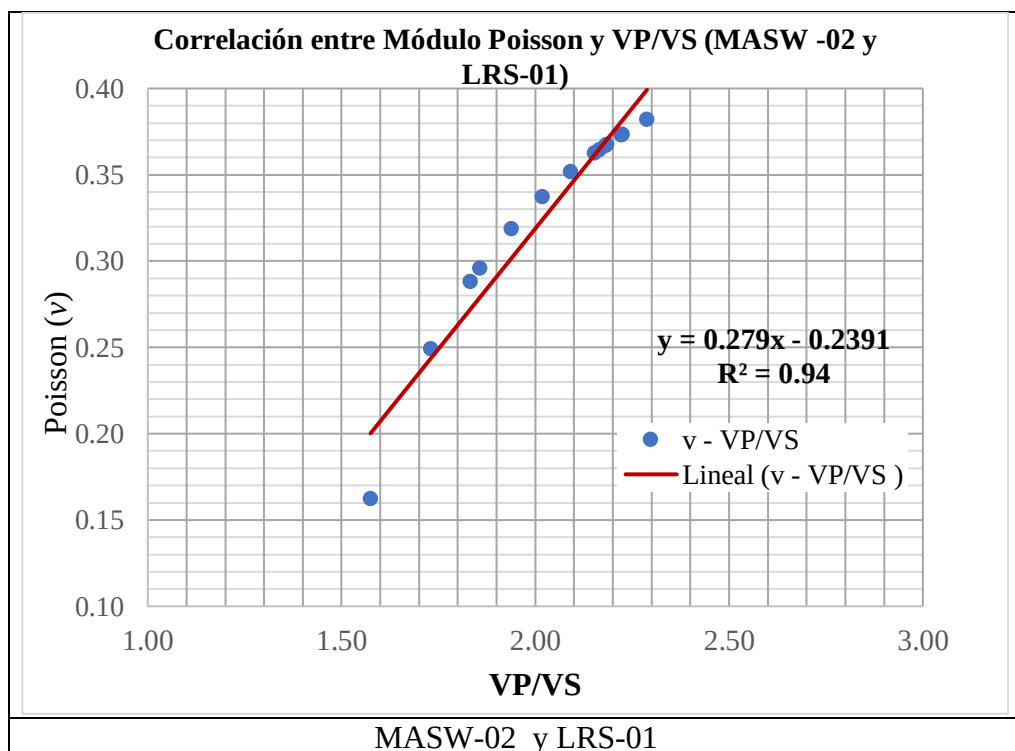
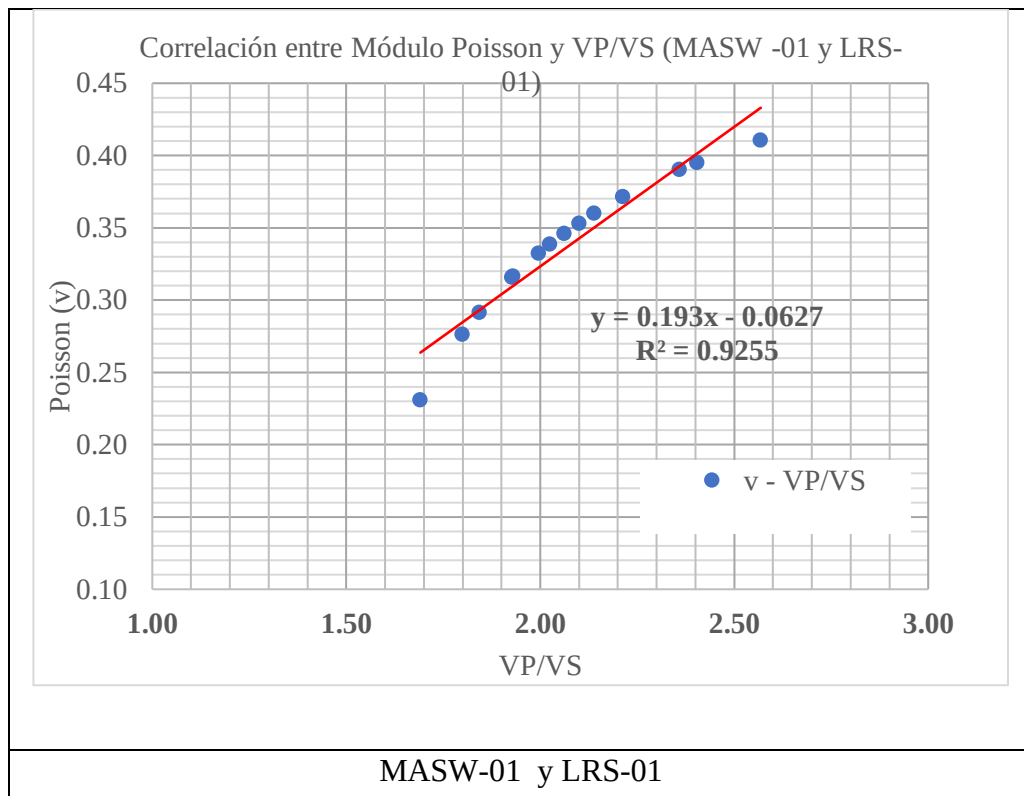


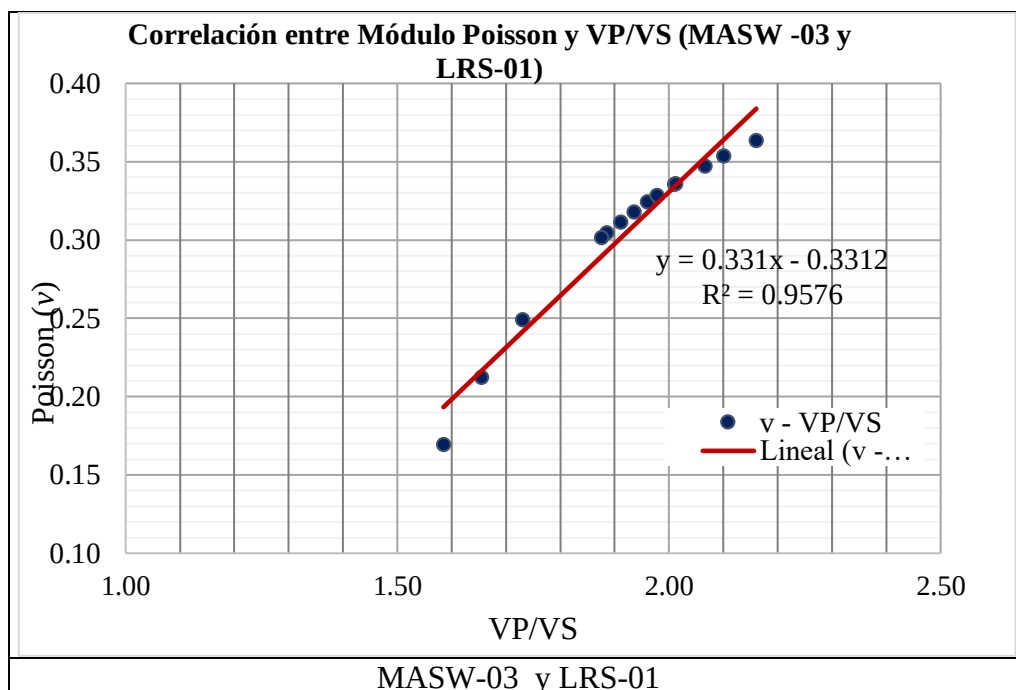
#### 4.3.3.2 Correlación entre Módulo de Poisson ( $\nu$ ) y la $V_p/V_s$

Sobre la correlación lineal entre el módulo de Poisson ( $\nu$ ) y el cociente de las velocidades de onda ( $V_p/V_s$ ) presenta un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.941 respectivamente (Figura 29) lo que indica que entre 92.55% y 95.77% de variabilidad de velocidades de onda explica una relación directa utilizada para la caracterización de los materiales de la zona de estudio.

Asimismo, se puede advertir que para la relación entre “ $V_p/V_s$ ” y el coeficiente de Poisson “ $\nu$ ” para el suelo tipo  $S_2$  de la asociación Neysser Llacsá, se puede inferir que cuanto más cercana esté la velocidad de onda  $V_s$  a la de  $V_p$ , mayor es la rigidez del material, sobre todo cuando se inicia a duplicarse, por lo que el ángulo de reposo o de fricción interna es más elevado.

*Figura 29: Correlación de Módulo de Poisson Vs VP/VS*



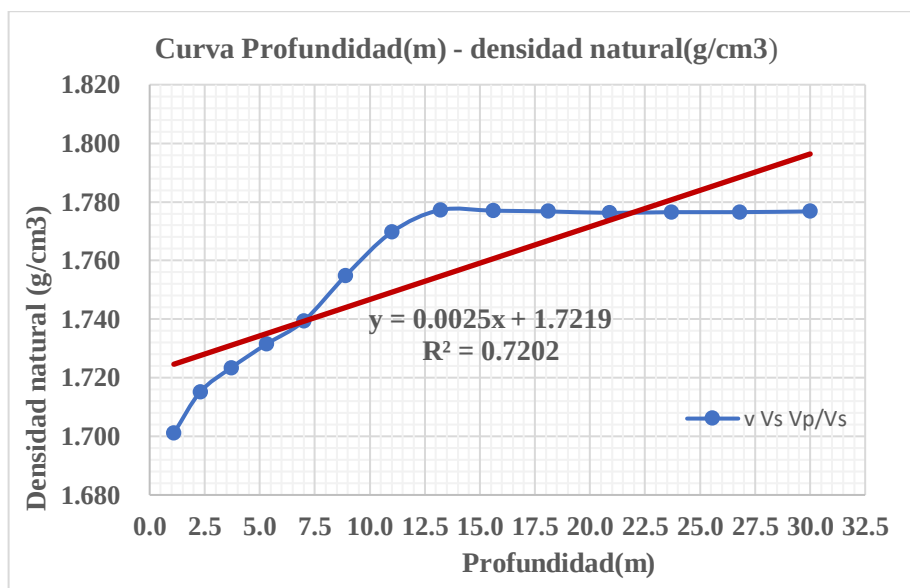


#### 4.3.3.3 Densidad natural

Sobre la base de la propagación de la velocidad las ondas sísmicas compresionales (VP), obtenidas mediante el método de refracción sísmica, es posible estimar de manera indirecta la densidad natural del terreno utilizando la relación empírica propuesta por Naranjo et al. (2013) (Ecuación 19).

Sobre la Figura 30, se observa la distribución de la densidad del terreno y su correspondiente relación matemático para la línea de refracción sísmica LRS-01. En este perfil, la densidad a nivel superficial, entre 0 y 5 m, es aproximadamente de 1,71 g/cm<sup>3</sup>, incrementándose de forma gradual hasta 1.78 gr/cm<sup>3</sup> entre 12.5 a 30 m de profundidad. Este comportamiento se debe a las características de los materiales de los distintos estratos atravesados por la onda sísmica, lo que impide una distribución lineal de la densidad con la profundidad. Por ello, se aplicó un ajuste matemático mediante análisis de regresión lineal, obteniéndose una representación más coherente de la tendencia de los datos de densidad para la línea LRS-01, con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,7202$ .

Figura 30: Ajuste de regresión lineal para distribución de densidad en LRS-01

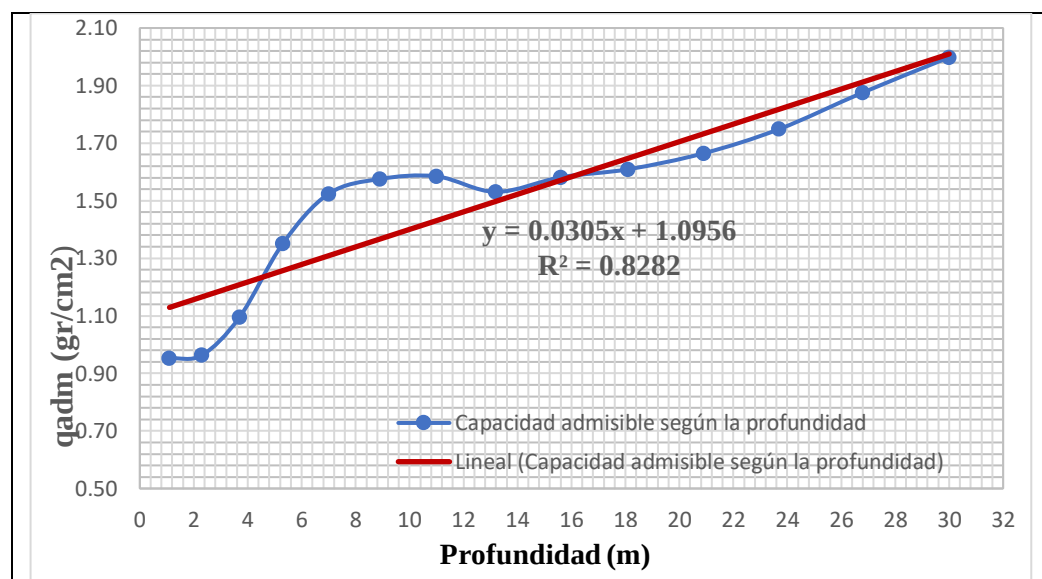


#### 4.3.3.4 Capacidad admisible en base a métodos sísmicos (Método geofísico)

Respecto al cálculo de la capacidad portante admisible, se consideran los valores de velocidad de corte (Vs) y la compacidad natural del suelo, calculados a partir de los ensayos MASW 1D. Para ello, se emplea la ecuación 20 planteado por Tezcan et al. (2006):

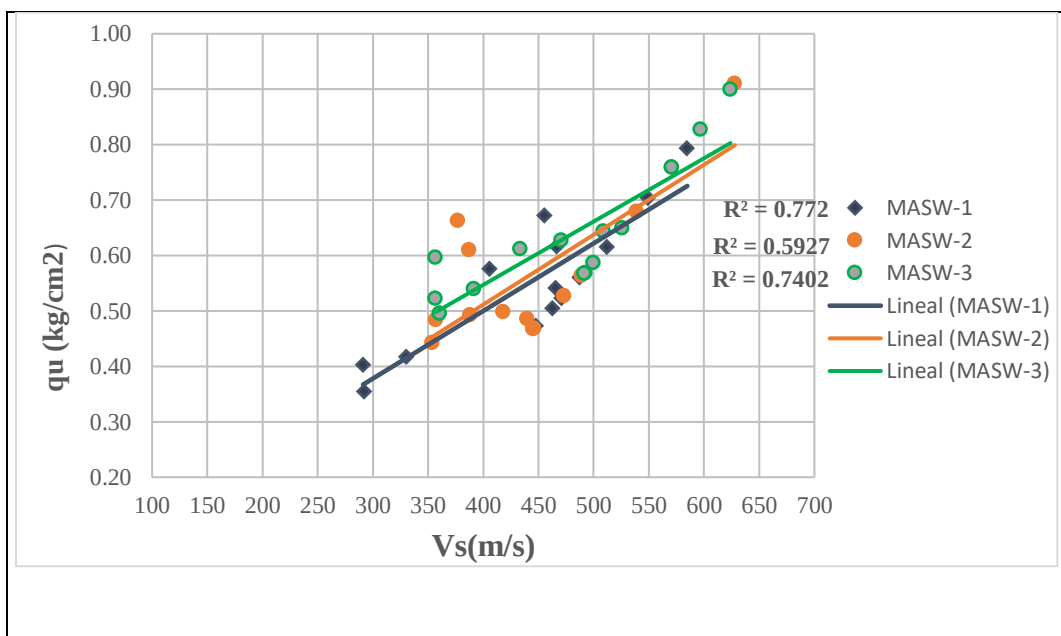
En la Figura 31, la correlación entre la capacidad admisible de suelo y según la profundidad de suelo de cimentación es fuerte, ello se debe a la consolidación de suelo a profundidades mayores, asimismo,  $\alpha=0.77$ ,  $B=6m$  (ancho de la zapata de cimentación), a profundidades entre 0-2.5m la capacidad admisible del suelo se encuentra entre  $0.952g/cm^2$  y un promedio de  $q_{adm}= 1.324g/cm^2$ , además entre 5-10m la capacidad está entre  $1.53g/cm^2$  y  $1.57g/cm^2$ , finalmente se puede deducir que desde 7m hasta 20m de profundidad la capacidad admisible del suelo es  $q_{adm}=1.58g/cm^2$ , con un correlación positiva de  $R^2=0.9046$ . Los resultados que se presentan, son concordantes con los resultados obtenidos en

Figura 31: Correlación de capacidad admisible y profundidad MASW-01 y LRS-001



Finalmente, la correlación entre la resistencia a la compresión ( $q_u$ ) y la velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) (Figura 32) evidencia que la línea de tendencia de tipo potencial representa una relación significativa entre ambas variables, con un coeficiente de correlación de 0.772, lo cual refuerza la dependencia directa de la rigidez y la densidad del suelo.

Figura 32: Relación de velocidad ( $V_s$ ) y resistencia a la compresión ( $q_u$ )



#### 4.4 PRUEBA ESTADÍSTICA

Para el análisis de la prueba estadística de los datos de la muestra, y con la finalidad de tomar decisiones de la hipótesis sobre la población con un nivel de confianza de 0.05, primero se debe verificar la normalidad de datos, para ello utilizamos la prueba de Shapiro-Wilk ( $n \leq 50$ ).

##### 4.4.1 Verificación de Normalidad de MASW y Refracción Sísmica.

Para realizar la prueba estadística y la normalidad de los datos obtenidos mediante los ensayos MASW y Refracción Sísmica, las velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) y velocidad de ondas compresionales ( $V_p$ ), siguen una distribución normal, antes de aplicar las pruebas de análisis estadístico.

En la Tabla 9, según test de Shapiro -Wilk, los resultados indican que las velocidades de ondas, presentan valores de nivel de confianza  $p$  mayor a 0.05, lo que indica que los datos siguen una distribución normal. En consecuencia, para la comprobación de la hipótesis se empleará una prueba paramétrica, específicamente la prueba de  $t$  de Student.

Para el análisis de la prueba se planteó lo siguiente:

$H_0$  = Los datos obtenidos mediante MASW y Refracción Sísmica siguen una distribución normal.

$H_1$  = Los datos obtenidos mediante MASW y Refracción Sísmica No siguen una distribución normal.

*Tabla 9: Verificación de Normalidad de datos MASW-1,2,3 y LRS-1*

| Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk) |          |          |
|-------------------------------------|----------|----------|
|                                     | <b>W</b> | <b>p</b> |
| <b>MASW -01</b>                     | 0.912    | 0.166    |

Nota. Un valor  $p$  bajo sugiere una violación del supuesto de normalidad

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk)

|                 | <b>W</b> | <b>p</b> |
|-----------------|----------|----------|
| <b>MASW -02</b> | 0.923    | 0.246    |

Nota. Un valor p bajo sugiere una violación del supuesto de normalidad.

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk)

|                | <b>W</b> | <b>p</b> |
|----------------|----------|----------|
| <b>MASW-03</b> | 0.937    | 0.378    |

Nota. Un valor p bajo sugiere una violación del supuesto de normalidad.

Fuente: Software libre, Jamovi 2.6.44  
<https://www.jamovi.org/>

#### 4.5 COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS

##### A. Velocidad de corte (Vs): Velocidad media Vs30.

Según la norma E.030 en su artículo 12 Condiciones geotécnicas, perfiles de suelo corresponden a suelos relativamente rígidos, caracterizados por velocidades de propagación de onda de corte (Vs) entre 180m/s y 500m/s. En consecuencia, se plantea la siguiente hipótesis:

Ho = la velocidad media de las ondas de corte es igual a 455.5m/s

H1 = la velocidad media de las ondas de corte es diferente a 455.5m/s.

El resultado (Tabla 10) muestra un valor de  $p > 0.05$ ; en consecuencia, se acepta la hipótesis nula. Según esta evaluación, el área de estudio corresponde a un suelo de tipo S2 según la norma E.030, con resultados confiables hasta una profundidad de 20m. El estrato S2 está asociada a suelos granulares de compacidad media y en profundidad a suelo de arena limosa de compacidad media a densa; donde la velocidad media es de Vs30=455.5m/s.

Tabla 10: Prueba de Hipótesis Indicador Cohesión usando la prueba T de Student

Estadísticas descriptivas

T de una muestra: velocidad de ondas de corte.

| Muestra | N  | Media | Desv. Est. | Error estándar de la media. | IC de 95% para $\mu$ |
|---------|----|-------|------------|-----------------------------|----------------------|
| Vs-1    | 14 | 444.5 | 87.9       | 23.5                        | (393.7, 495.2)       |
| Vs-2    | 14 | 450.9 | 82.5       | 22                          | (403.2, 498.5)       |
| Vs-3    | 14 | 477.4 | 88         | 23.5                        | (426.6, 528.2)       |

$\mu$ : media de población de Vs-1

Prueba

Hipótesis nula

$H_0: \mu = 455.3$

Hipótesis alterna

$H_1: \mu \neq 455.3$

| Muestra | Valor T | Valor p |
|---------|---------|---------|
| Vs-1    | -0.46   | 0.652   |
| Vs-2    | -0.51   | 0.843   |
| Vs-3    | 0.94    | 0.364   |

#### B. Propiedad Mecánica: Capacidad admisible

#### C. Propiedad Mecánica: Capacidad Portante

Para la verificación de la capacidad portante, se considera lo establecido en la norma E.030 diseño sismorresistente, específicamente el artículo 7.4 cimentaciones sobre suelos flexibles o de baja capacidad portante. Según este artículo, un suelo se clasifica de baja capacidad cuando su capacidad es menor a 1.0 kg/cm<sup>2</sup> este valor nos lleva a plantear la siguiente hipótesis:

$H_0$  = la media de la capacidad portante determinada en campo es menor a 1.0 kg/cm<sup>2</sup>

$H_1$  = la media de la capacidad portante determinada es mayor a 1.0kg/cm<sup>2</sup>



El resultado de la prueba T de Student (Tabla 11) nos indica un valor de  $p > 0.05$ , por lo tanto, se acepta la hipótesis nula. Por lo tanto, las medidas de la capacidad portante  $q_u$ (kg/cm<sup>2</sup>), son resultados confiables hasta una profundidad de 30m. El estrato S2 está asociada a suelos granulares de compacidad media y la capacidad promedio es de 0.58Kgcm<sup>2</sup> en suelo de arena limosa de compacidad media a densa.

*Tabla 11: Prueba de hipótesis Indicador Capacidad portante ultima usando la prueba T de Student*

Estadísticas descriptivas

T de una muestra: velocidad de ondas de corte.

| Muestra | N  | Media  | Desv.Est. | Error estándar de la media. | IC de 95% para $\mu$ |
|---------|----|--------|-----------|-----------------------------|----------------------|
| qu-1    | 14 | 0.5542 | 0.122     | 0.0326                      | (0.4838, 0.6246)     |
| qu-2    | 14 | 0.5756 | 0.1352    | 0.0361                      | (0.4975, 0.6536)     |
| qu-3    | 14 | 0.6355 | 0.1167    | 0.0312                      | (0.5681, 0.7029)     |

$\mu$ : media de población de qu-1, qu-2, qu-3

| Prueba               |         |         |
|----------------------|---------|---------|
| Hipótesis nula       |         |         |
| $H_0: \mu = 0.58$    |         |         |
| Hipótesis alterna    |         |         |
| $H_1: \mu \neq 0.58$ |         |         |
| Muestra              | Valor T | Valor p |
| qu-1                 | -0.79   | 0.443   |
| qu-2                 | -0.12   | 0.904   |
| qu-3                 | 1.78    | 0.099   |

## 4.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### CONCLUSIONES

Esta investigación se centra en la utilización de los métodos de refracción sísmica y MASW-1D para la caracterización geotécnica del terreno, así como para el análisis de la rigidez y la deformabilidad de los suelos de la Asociación Neiser-Llacsá ubicado en el distrito de ciudad Nueva, región Tacna. Las principales características que presenta son:

- La realización de los ensayos de refracción sísmica ha permitido elaborar un perfil o sección geosísmica denominado LRS-01 de una longitud de 115 metros lineales con una profundidad de investigación hasta los 15m al basamento de suelo rígido, según se detalla en el perfil longitudinal.
- En el perfil LRS-01 se muestran tres capas o estratos geosísmicos que se resume en la siguiente tabla:

| Estrato geosísmico | Rango de velocidades $V_p$ (m/s) | Espesor (m) | Litología Geosísmica                                                                                                         |
|--------------------|----------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                  | 700 a 830                        | 03 a 05     | Representan a depósitos tecnógenos, conformados de material granular de compacidad media.                                    |
| 2                  | 800 a 988                        | 05 a 10     | Se asocia a depósito coluvial de arena limosa de compacidad media a densa.                                                   |
| 3                  | > 988                            | $\infty$    | Representa a depósito coluvial con bloques o cantos rodados de tobas volcánicas con matriz arena limosa de compacidad densa. |

- Mediante las ondas de corte  $V_s$ , es posible caracterizar la rigidez de los primeros 30m de profundidad al incrementar el contenido de altas frecuencias mediante impactos aleatorios con martillo cada 5m a lo largo de la línea de geófonos. Si bien la adquisición de datos en campo es relativamente sencilla, no siempre es posible garantizar la calidad de los registros obtenidos.
- Se ejecutaron los sondeos de MASW-01, MASW-02 y MASW-03, con arreglo lineal de geófonos y espaciamiento de 2.5 m entre geófonos de 4.5 Hz, llegando a una profundidad de investigación confiable hasta los 30 m. Los tres sondeos muestran velocidades  $V_s$  entre 291 m/s y 628 m/s, los  $V_{s30}$  están entre 455.3 m/s y 490.5 m/s, por tanto, la zona de estudio, se clasificada según E.030 como suelo de tipo S2 que representa a suelos intermedios y según IBC-2021 como suelo de tipo **C** que representa a suelo arenoso muy densa.
- Para la zona de estudio se han determinado los parámetros dinámicos del suelo con las velocidades de ondas sísmicas  $V_s$  y  $V_p$  obtenidas con los ensayos MASW-01 y Refracción Sísmica LRS-01. Ver los parámetros estimados en el Anexo nº 2.
- La técnica de MASW-1D utiliza el mismo equipo y la misma disposición de geófonos que la refracción sísmica, lo que permite determinar las velocidades de propagación de las ondas S ( $V_s$ ) y P ( $V_p$ ) en los mismos puntos de medición.
- A partir de la velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) es posible calcular los módulos de deformación, los cuales son esenciales para evaluar como responderá el terreno frente a las sollicitaciones de las estructuras que descansarán sobre él.

## RECOMENDACIONES

- Integrar los estudios geofísicos con ensayos de sondaje eléctrico vertical para establecer la cota del nivel freático, dado que la presencia de agua en los poros del terreno afecta su comportamiento dinámico.
- Realizar un análisis de amplificación sísmica en la estación, considerando los perfiles unidimensionales de ondas de corte obtenidos a partir de los ensayos MASW y refracción sísmica.
- Considerar la ejecución de exploraciones geotécnicas adicionales en la zona de estudio, como calicatas profundas, con el objetivo de determinar la granulometría, la densidad natural y los parámetros de resistencia de muestras inalteradas.
- El valor promedio de los valores de  $V_s$  para los 30 metros ( $V_{s30}$ ) constituye un parámetro reconocido universalmente y aceptado para la clasificación de suelos, según las normas de la IBC (Internacional Building Code) y AASHTO. Asimismo, estas normas están referidas a la respuesta del terreno frente a las solicitaciones sísmicas.

## REFERENCIAS

- Alexopoulos et al., J. D. (2022). Near-Surface Geophysical Characterization of Lithologies in Corfu and Lefkada Towns (Ionian Islands, Greece). *Geosciences*, 12. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/loi/tgnh20>
- Aristizábal Arias, J. (2017). Obtención de propiedades mecánicas a partir de la relación  $V_p/V_s$  para depósitos superficiales de ceniza volcánica en Manizales Colombia. 32, 22.
- ASTM. Designation, D. (1995). Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. *American Society for Testing and Materials*, pág. 35.
- Bernal, I. (2018). *Zonificación Sísmica – Geotécnica del área urbana de Ciudad Nueva*. Lima: Instituto Geofísico del Perú.
- Blamires, D. (2022). Revista Sapiência Sociedade Saberes E Práticas Educacionais. *Educacionais*, (2238-3565). Obtenido de <https://doi.org/10.31668/revsap.v11i1.13289>
- Bowles, J. E. (1979). *Propiedades Geofísicas de los Suelos*. Colombia: McGraw-Hill.
- Braja, D. (2007). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: RPK Editorial.
- Cabrera, F. (2018). *iesgo Geotécnico de las Asociaciones de vivienda sol naciente y dos de febrero, Ciudad Nueva-Tacna*. Tacna.
- Cantos, J. (1987). *Tratado de Geofísica Aplicada*. Madrid: Ediciones Narcea.
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. México: Limusa.
- E.30, N. T. (22 de Octubre de 2018). Diseño Sismorresistente. *Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda Que Modifica La Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” Del Reglamento Nacional De Edificaciones, Aprobada Por Decreto Supremo N° 011-2006-Vivienda, Modificada Con Decreto Supremo N° 002-2014-Vivienda*. Lima, Lima: Diario el Peruano.
- Foti, S. (2014). *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*. Londres: Taylor & Francis Group.
- Gonzales L., F. M. (2004). *Ingeniería Geológica*. España: Pearson Educación S.A.

- Heras Muchica, H. L. (2022). *Aplicación de metodologías geofísicas para la caracterización geológico – geotécnica con fines de cimentación de la urbanización las Lomaditas de Cayma – Arequipa*. Arequipa: UNSA.
- Heras, L. (2022). *APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS GEOFÍSICAS PARA LA CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICO – GEOTÉCNICA CON FINES DE CIMENTACIÓN DE LA URBANIZACIÓN LAS LOMADITAS DE CAYMA - AREQUIPA*. AREQUIPA.
- Lazcano, S. (2007). *Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie*. Mexico.
- Liu, C. (2008). *Soils and Foundations*. Columbus, Ohio: Pearson Prentice Hall.
- Machaca, G. (2020). Caracterización geotécnica de la ignimbrita Pachía mediante técnicas tradicionales y geofísicas de refracción sísmica y microtemores (MASW), distrito de Pocollay-Tacna. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, boletín N° 15*, 5.
- Machaca, G. M. (2021). Caracterización geotécnica de la ignimbrita Pachía mediante técnicas tradicionales y geofísicas de refracción sísmica y microtemores (MASW), distrito de Pocollay-Tacna”. *Journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091*, 528-532.
- Martinez, P. (2008). *Prospección Geofísica-2, método sísmico*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Muhammad et al., Z. A. (2023). Estimation of VS30 using shallow depth time-averaged shear wave velocity of Rawalpindi–Islamabad, Pakistan. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1-22. Obtenido de <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2161953>
- NTP.339-154. (15 de mayo de 2015). Método de ensayo normalizado para Propiedades de consolidación unidimensional de suelos. *Suelos*. Lima, Lima: CNB INDECOPI.
- Ólafsdóttir, E. Á. (2014). *Multichannel Analysis of Surface Waves Methods for dispersion analysis of surface wave data*. Islandia: School of Engineering and Natural Sciences.

- Perez, I. (2015). *Caracterización geotécnica de los suelos de Madrid mediante la técnica REMI (Refraction Microtremor) : aplicaciones en la ingeniería civil*. España.
- Rebata, C. (2021). *Aplicacion de ensayo MASW para la determinacion de las velocidades de onda y correlacion con el ensayo CPT*. Lima.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. India: Wiley-Blackwell.
- Rivera, M. (2016). Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras en edificaciones. *Civilizate* n° 8, 8.
- Tezcan, S. S. (2009). Seismic technique to determine the allowable bearing pressure for shallow foundations in soils and rocks. *Earthquake Resistant Engineering Structures*, 24.
- Tezcan, S. S. (2011). A Refined Formula for the Allowable Soil Pressure Using Shear Wave Velocities. *Open Acces*, 8.
- Wang, H. &. (2015). A New Method for Estimating VS (30) from a Shallow Shear-Wave Velocity Profile (Depth <30 m). *Bulletin Of the Seismological Society of America*, 12.

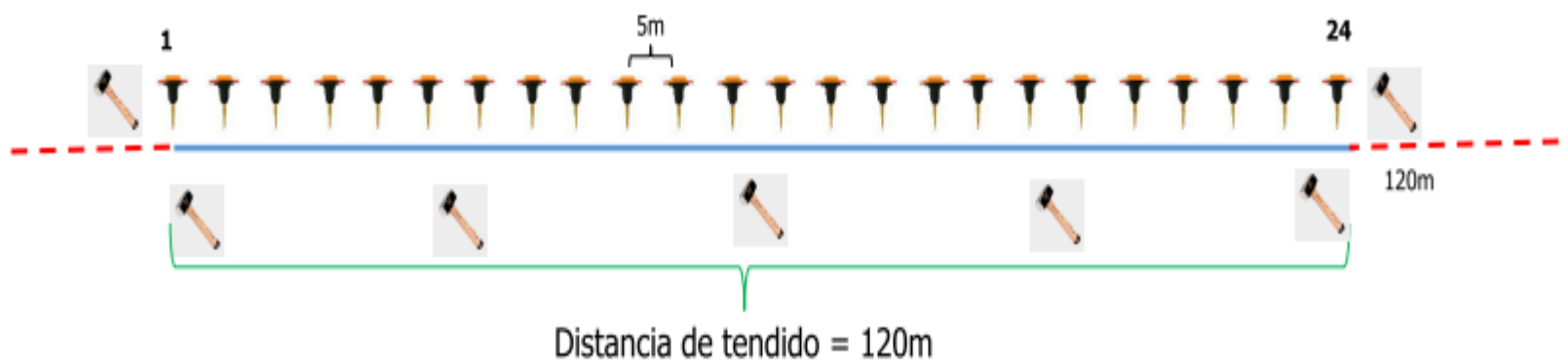
## **APÉNDICE**



## **ANEXOS**

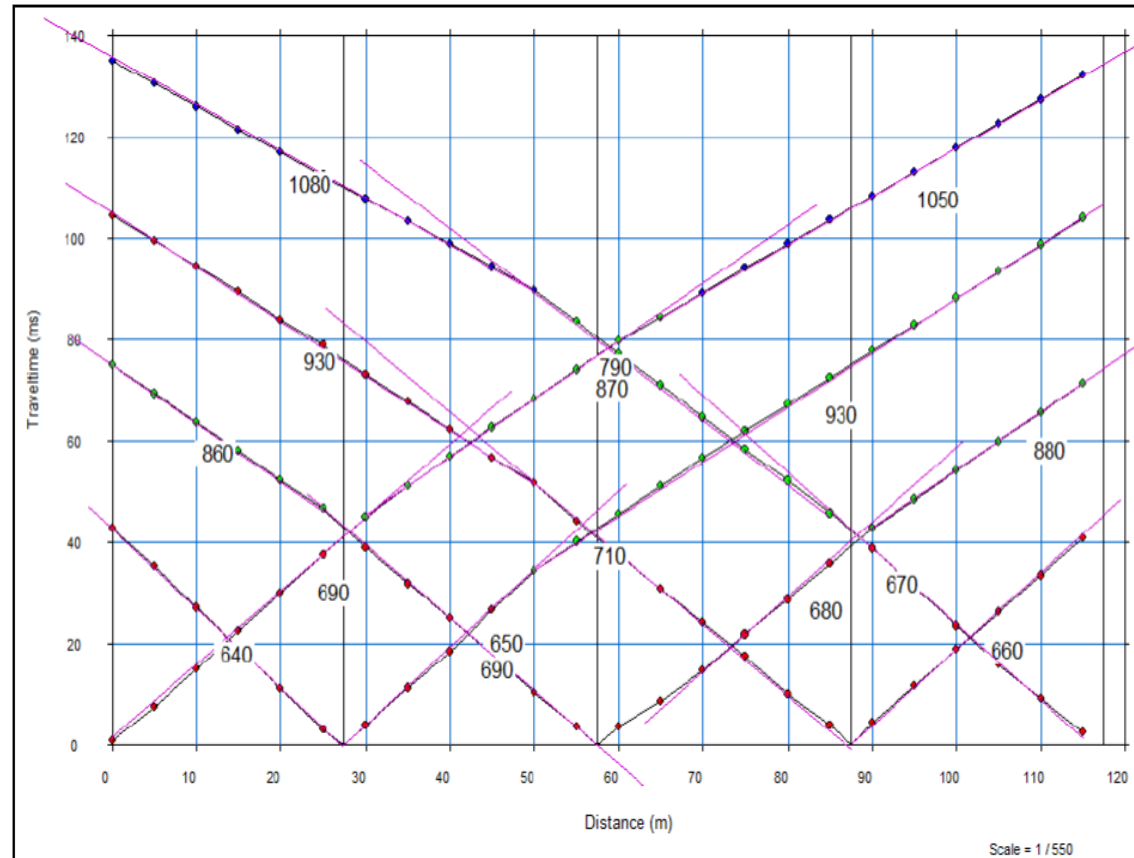
*ANEXO 1: Refracción y Análisis multicanal de onda superficiales*

### Línea de Refracción Sísmica LRS -01

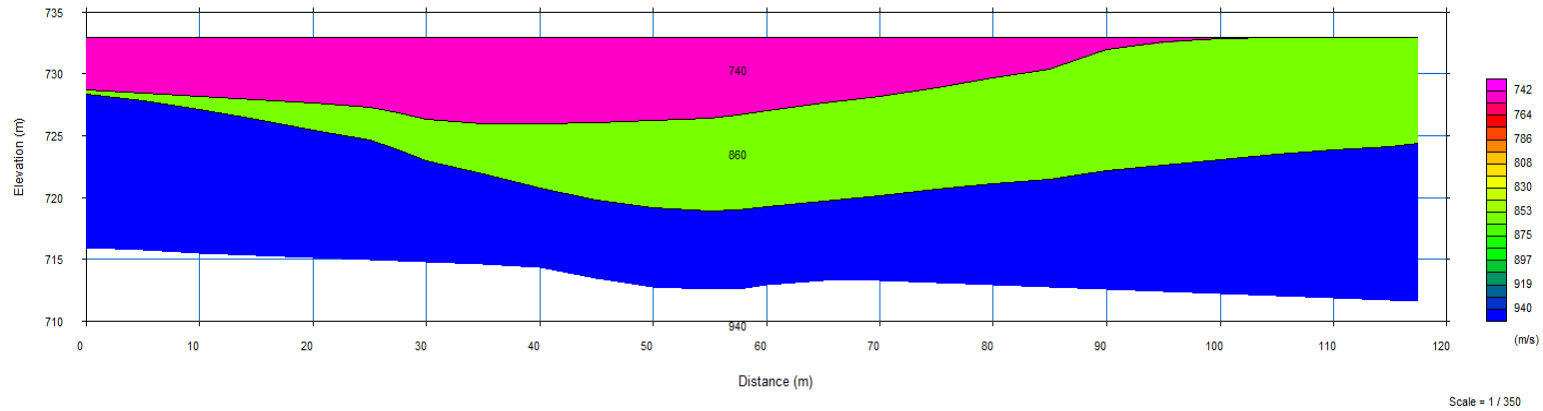


## Refracción Sísmica LRS -01 de 120m

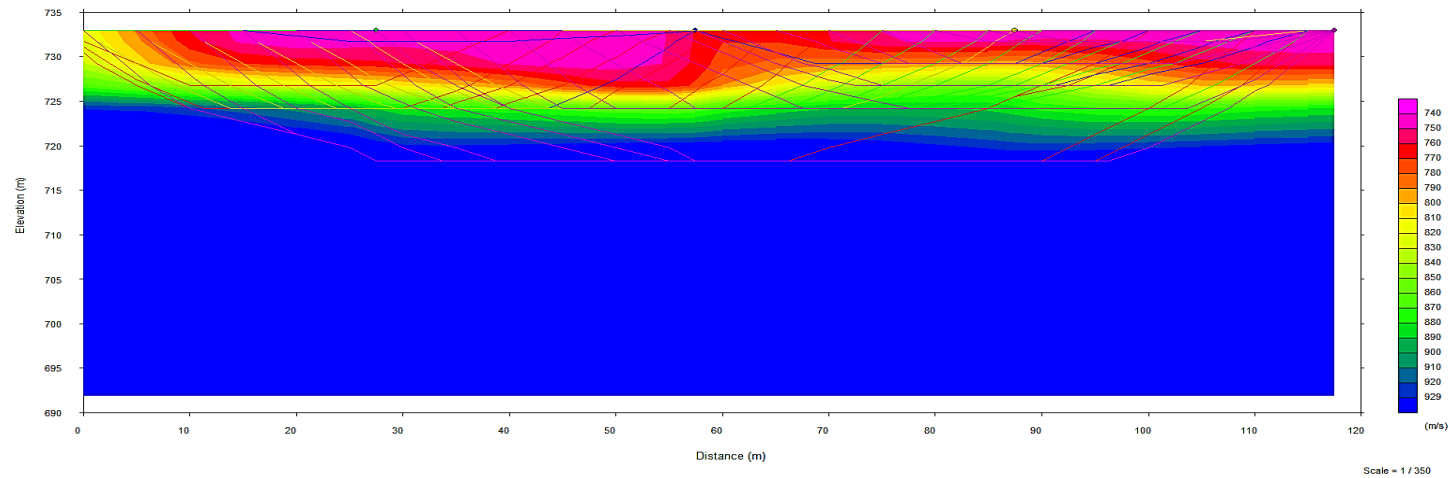
### Dromocrona de LRS-01



### Modelo inicial de Refracción Sísmica LRS-01

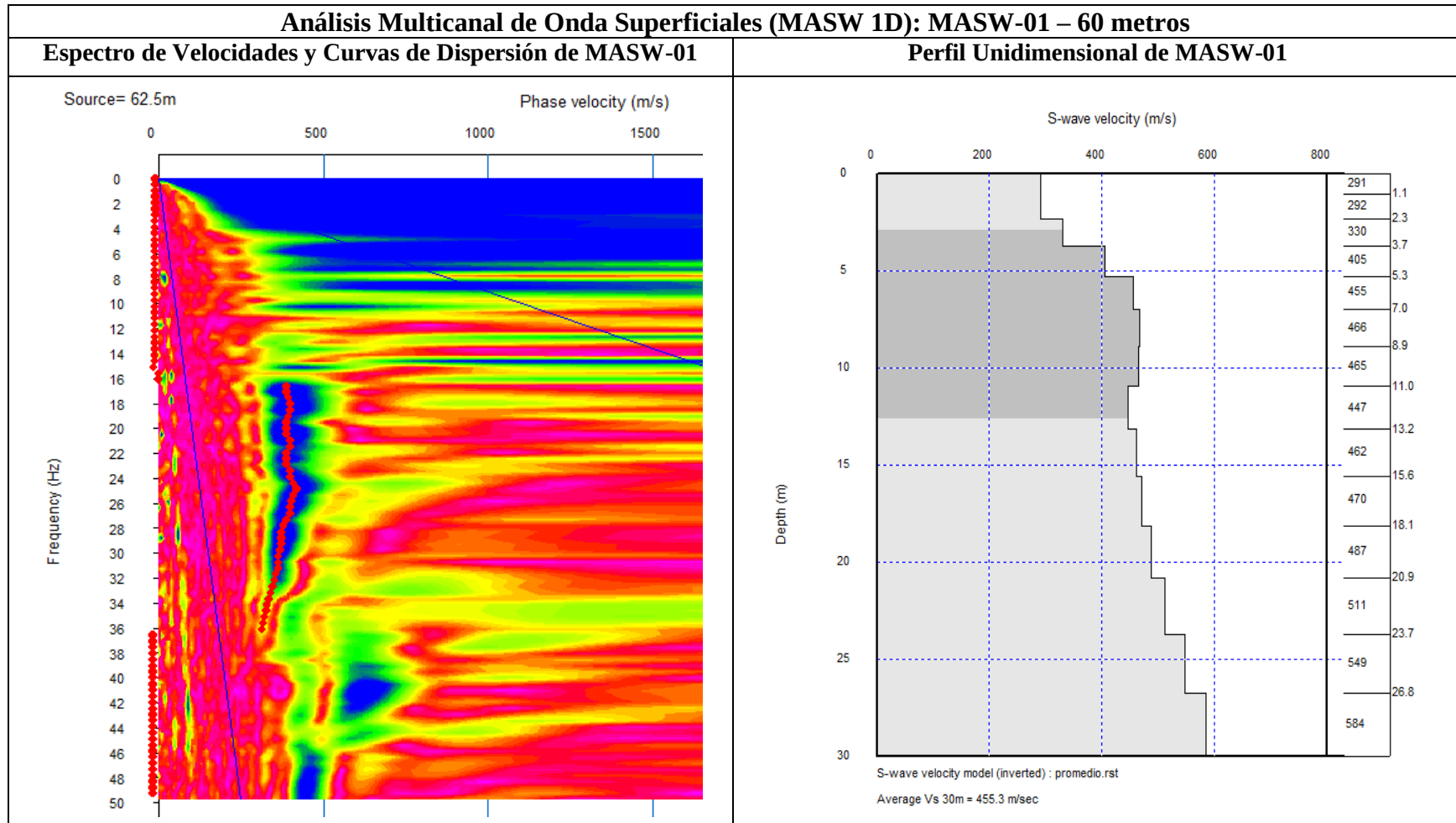


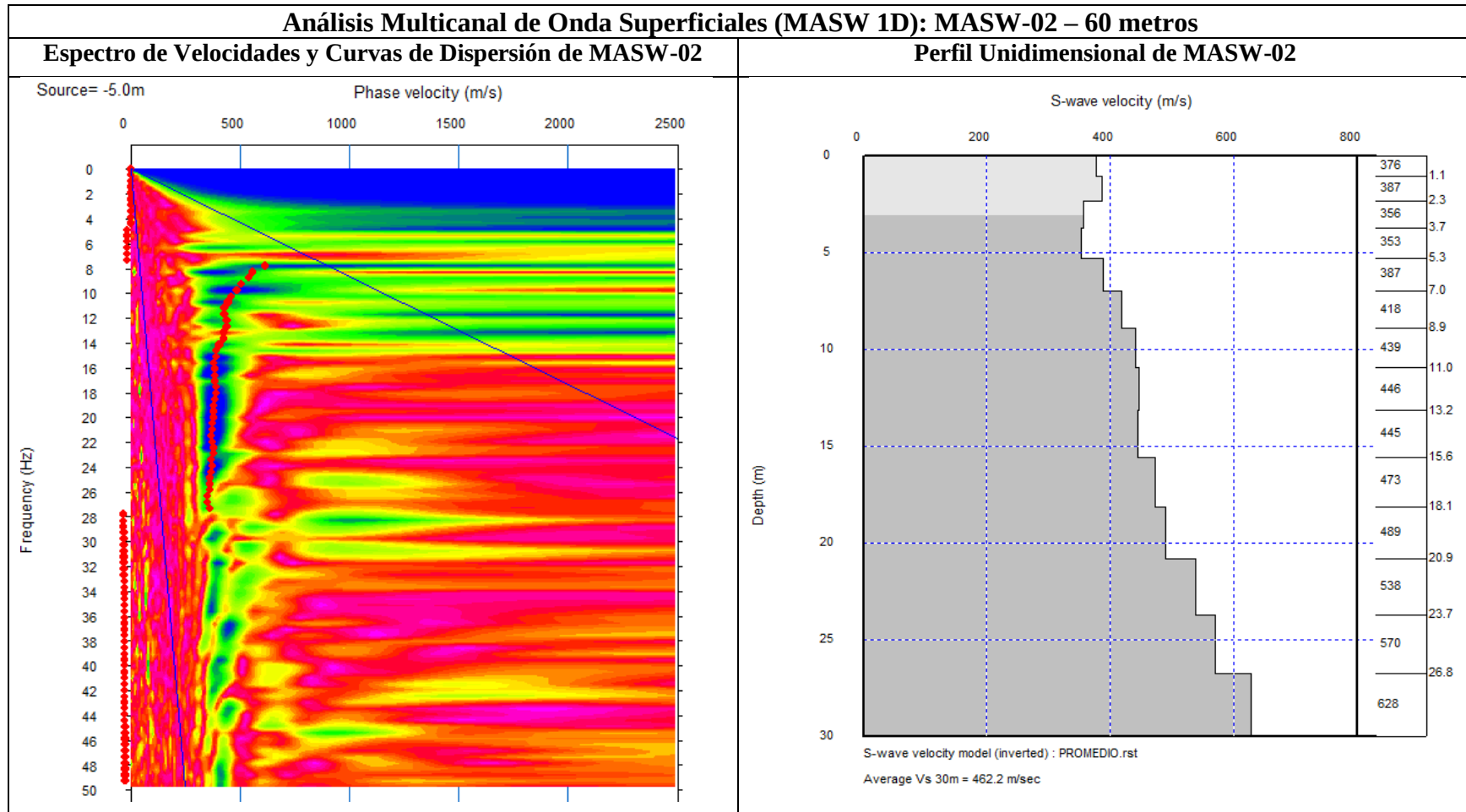
### Perfil Tomográfico de Refracción Sísmica LRS-01

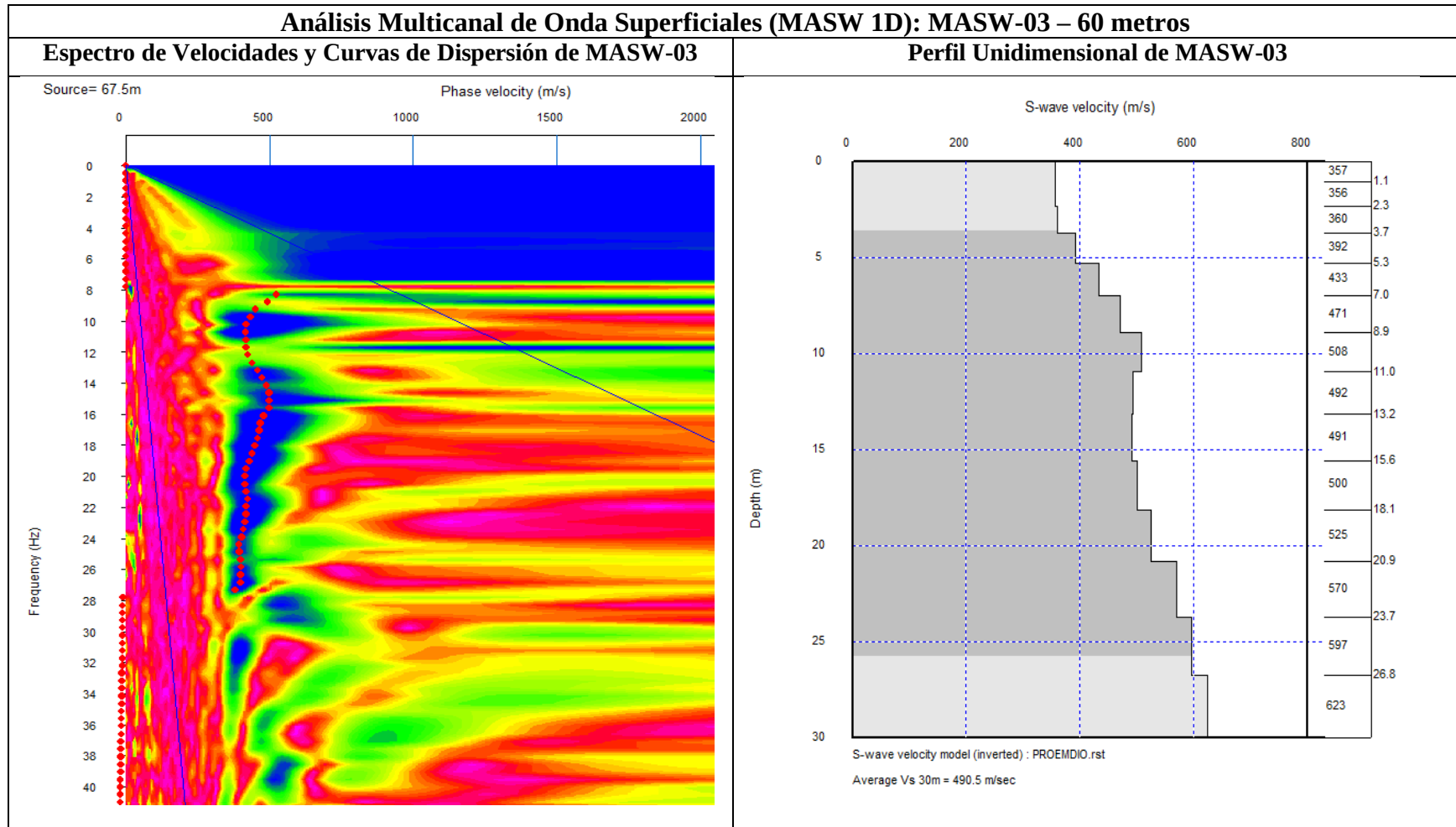


**Análisis Multicanal de Onda Superficiales Líneas MASW 1D: MASW-01, MASW-02 y MASW-3**



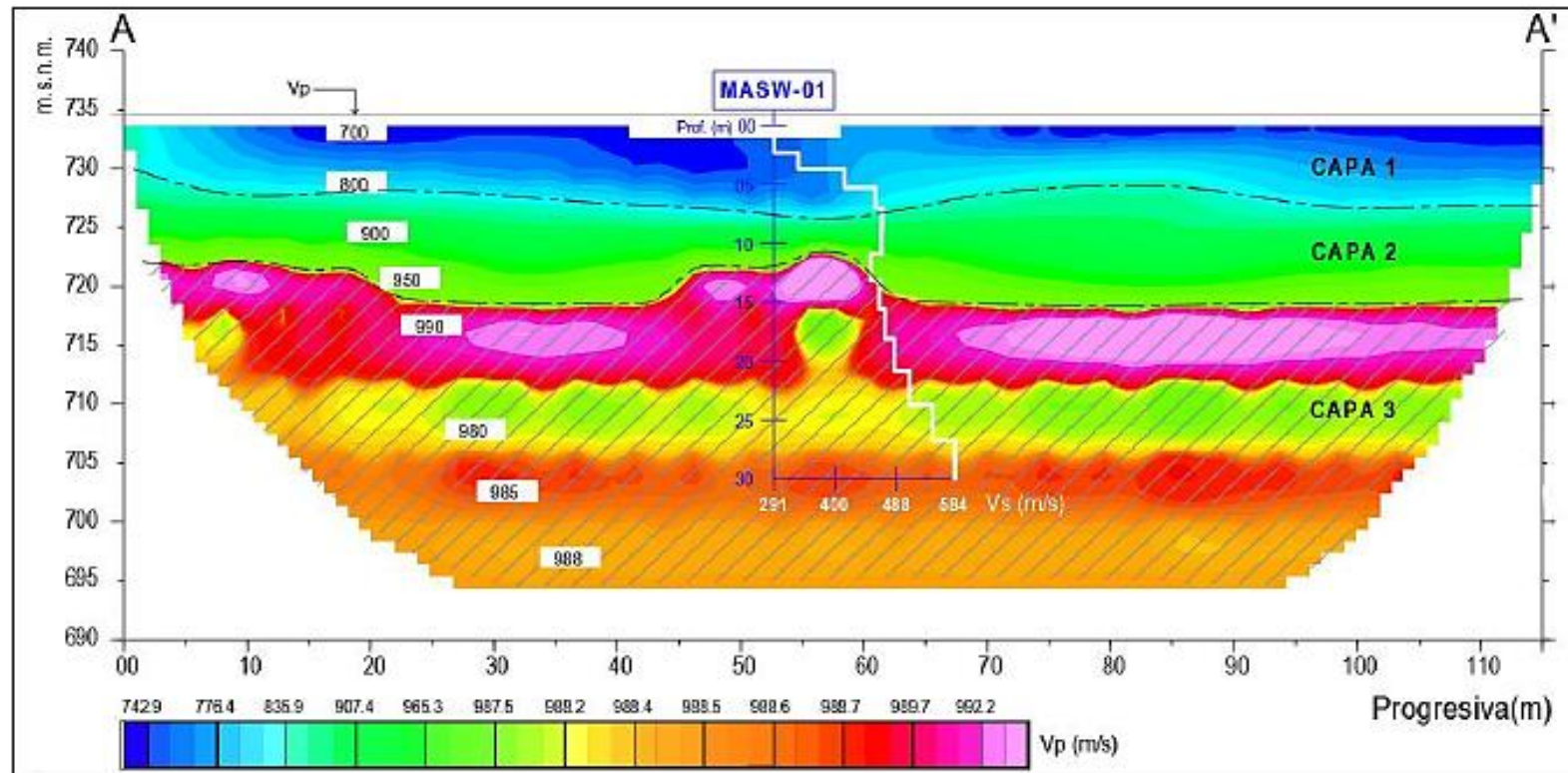








Perfil de Refracción Sísmica LRS-01



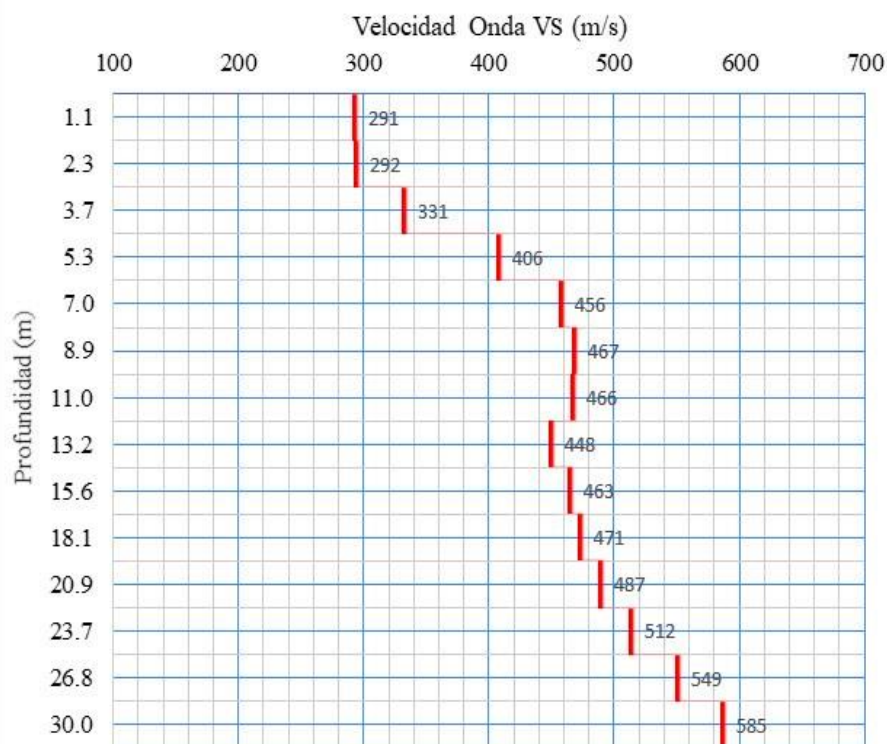
*ANEXO 2: Modelo unidimensional y resultados*

## Análisis Multicanal de Onda Superficiales (MASW 1D): MASW-01 PARÁMETROS DINÁMICOS CON MASW-01 Y LRS-01

| Prof.                                                                  |      | Espesor | Vs    | Vp    | Vp /Vs | $\rho$  | Gmax   | v         | Emax    | 10%Emax |
|------------------------------------------------------------------------|------|---------|-------|-------|--------|---------|--------|-----------|---------|---------|
| (m)                                                                    |      | (m)     | (m/s) | (m/s) |        | (Kg/m³) | (Mpa)  | (Poisson) | Mpa     | Mpa     |
| 0 - 1.1                                                                | 1.1  | 1.1     | 291   | 700   | 2.40   | 1647.58 | 139.67 | 0.40      | 389.79  | 38.98   |
| 1.1 - 2.3                                                              | 2.3  | 1.2     | 292   | 750   | 2.57   | 1676.25 | 142.93 | 0.41      | 403.27  | 40.33   |
| 2.3 - 3.7                                                              | 3.7  | 1.4     | 331   | 780   | 2.36   | 1692.77 | 184.98 | 0.39      | 514.44  | 51.44   |
| 3.7 - 5.3                                                              | 5.3  | 1.6     | 406   | 810   | 2.00   | 1708.81 | 281.33 | 0.33      | 749.76  | 74.98   |
| 5.3 - 7                                                                | 7.0  | 1.7     | 456   | 840   | 1.84   | 1724.42 | 358.00 | 0.29      | 924.75  | 92.48   |
| 7 - 8.9                                                                | 8.9  | 1.9     | 467   | 900   | 1.93   | 1754.42 | 382.38 | 0.32      | 1006.38 | 100.64  |
| 8.9 - 11                                                               | 11.0 | 2.1     | 466   | 960   | 2.06   | 1782.96 | 386.61 | 0.35      | 1040.87 | 104.09  |
| 11 - 13.2                                                              | 13.2 | 2.2     | 448   | 991   | 2.21   | 1797.18 | 360.49 | 0.37      | 988.94  | 98.89   |
| 13.2 - 15.6                                                            | 15.6 | 2.4     | 463   | 990   | 2.14   | 1796.73 | 384.83 | 0.36      | 1046.86 | 104.69  |
| 15.6 - 18.1                                                            | 18.1 | 2.6     | 471   | 989   | 2.10   | 1796.27 | 398.46 | 0.35      | 1078.50 | 107.85  |
| 18.1 - 20.9                                                            | 20.9 | 2.7     | 487   | 987   | 2.03   | 1795.36 | 426.42 | 0.34      | 1141.77 | 114.18  |
| 20.9 - 23.7                                                            | 23.7 | 2.9     | 512   | 988   | 1.93   | 1795.82 | 470.59 | 0.32      | 1239.08 | 123.91  |
| 23.7 - 26.8                                                            | 26.8 | 3.0     | 549   | 988   | 1.80   | 1795.82 | 541.47 | 0.28      | 1382.41 | 138.24  |
| 26.8 - 30                                                              | 30.0 | 3.2     | 585   | 989   | 1.69   | 1796.27 | 614.35 | 0.23      | 1512.74 | 151.27  |
| ρ: Densidad natural estimada, G: Módulo de rigidez; E: Módulo de Young |      |         |       |       |        |         |        |           |         |         |

### Análisis Multicanal de Onda Superficiales (MASW 1D): MASW-01

Perfil de Velocidades de MASW-01

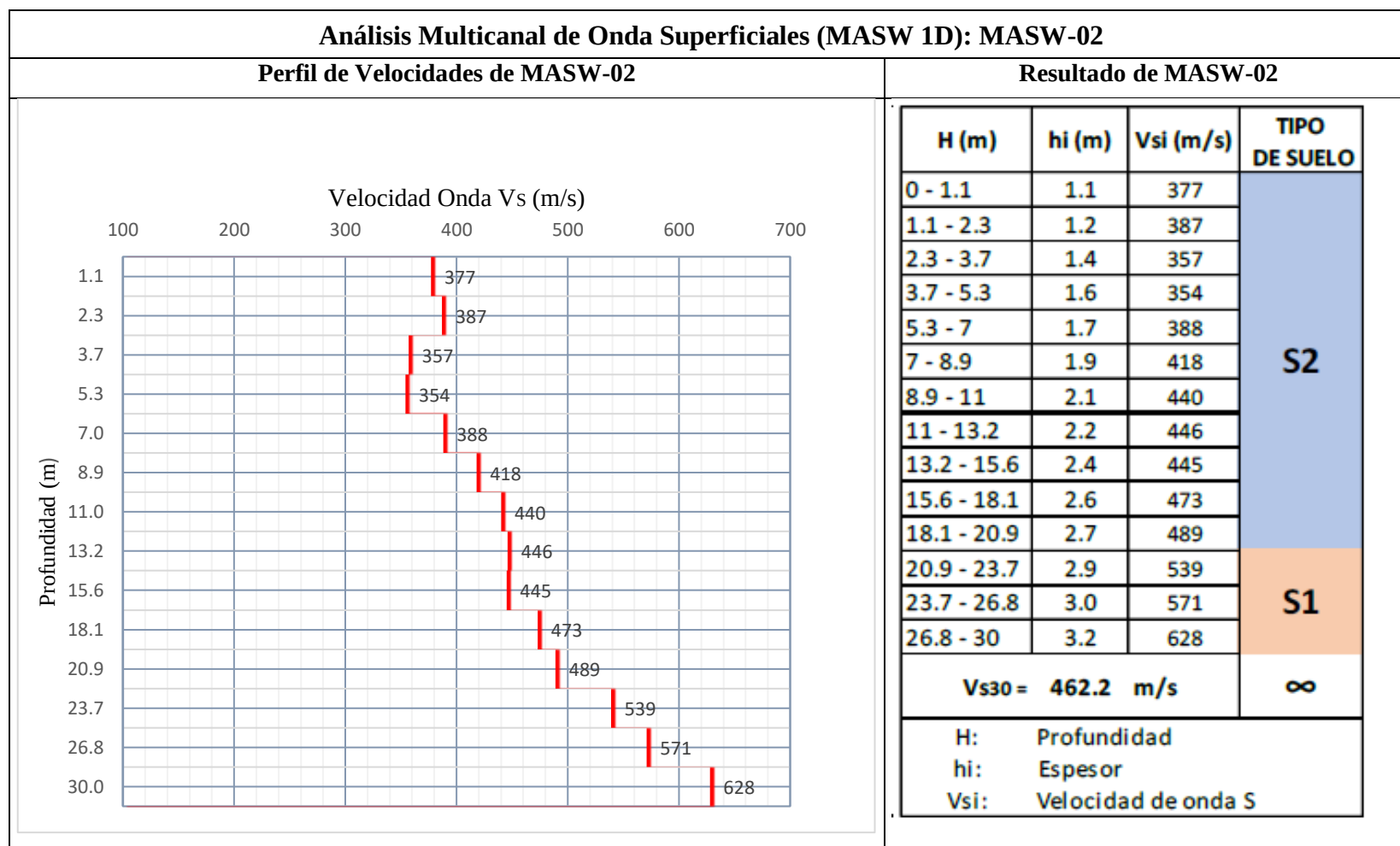


Resultado de MASW-01

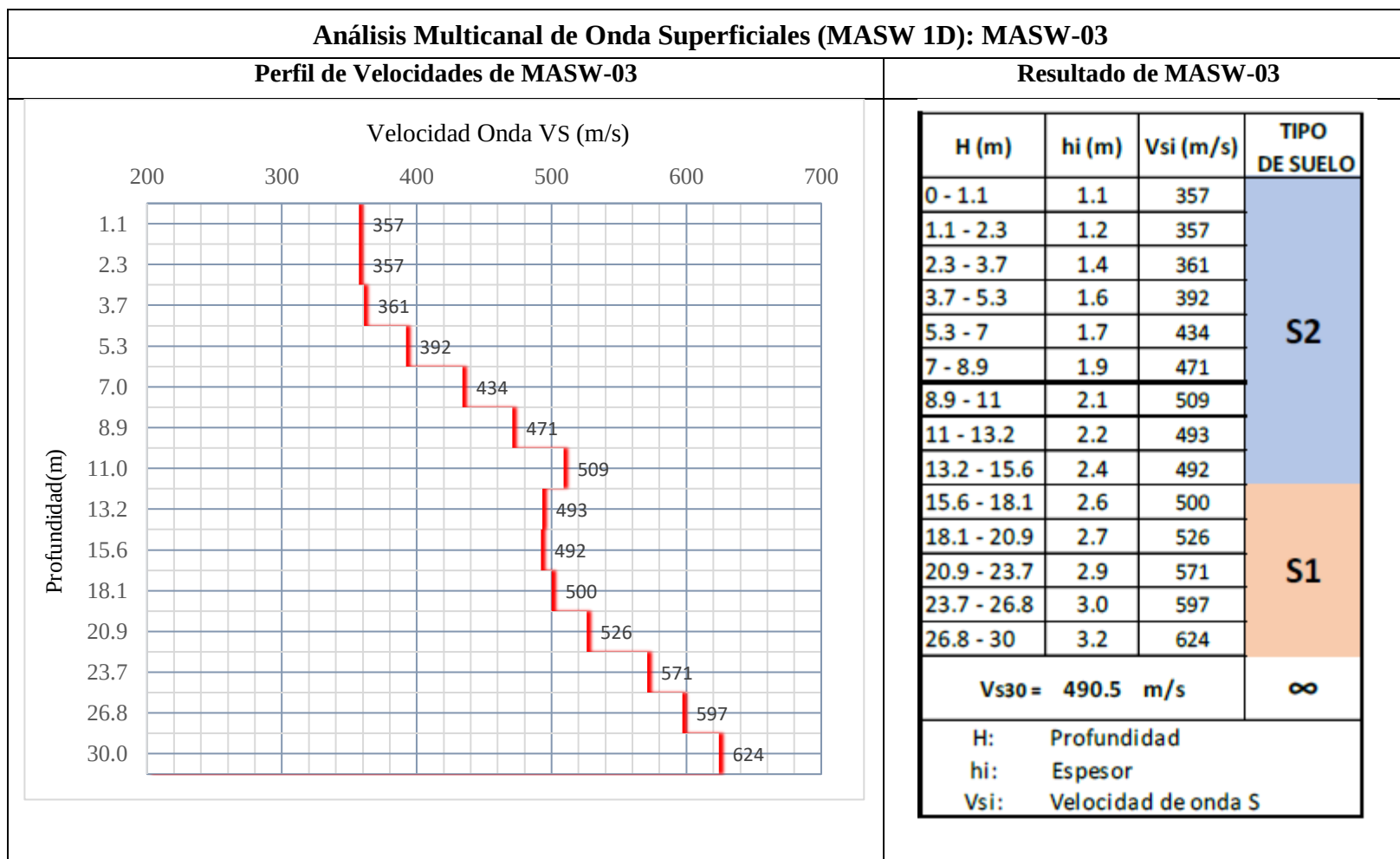
| H (m)            | hi (m)              | Vsi (m/s) | TIPO DE SUELO |
|------------------|---------------------|-----------|---------------|
| 0 - 1.1          | 1.1                 | 291       | S2            |
| 1.1 - 2.3        | 1.2                 | 292       |               |
| 2.3 - 3.7        | 1.4                 | 331       |               |
| 3.7 - 5.3        | 1.6                 | 406       |               |
| 5.3 - 7          | 1.7                 | 456       |               |
| 7 - 8.9          | 1.9                 | 467       |               |
| 8.9 - 11         | 2.1                 | 466       |               |
| 11 - 13.2        | 2.2                 | 448       |               |
| 13.2 - 15.6      | 2.4                 | 463       |               |
| 15.6 - 18.1      | 2.6                 | 471       |               |
| 18.1 - 20.9      | 2.7                 | 487       | S1            |
| 20.9 - 23.7      | 2.9                 | 512       |               |
| 23.7 - 26.8      | 3.0                 | 549       |               |
| 26.8 - 30        | 3.2                 | 585       |               |
| Vs30 = 455.3 m/s |                     |           | ∞             |
| H:               | Profundidad         |           |               |
| hi:              | Espesor             |           |               |
| Vsi:             | Velocidad de onda S |           |               |

## Análisis Multicanal de Onda Superficiales (MASW 1D): MASW-02 PARÁMETROS DINÁMICOS CON MASW-02 Y LRS-01

| Prof.                                                                  |      | Espesor | Vs    | Vp    | Vp /Vs | $\rho$  | Gmax   | v         | Emax    | 10%Emax |
|------------------------------------------------------------------------|------|---------|-------|-------|--------|---------|--------|-----------|---------|---------|
| (m)                                                                    |      | (m)     | (m/s) | (m/s) |        | (Kg/m³) | (Mpa)  | (Poisson) | Mpa     | Mpa     |
| 0 - 1.1                                                                | 1.1  | 1.1     | 377   | 700   | 1.86   | 1647.58 | 234.17 | 0.30      | 606.83  | 60.68   |
| 1.1 - 2.3                                                              | 2.3  | 1.2     | 387   | 750   | 1.94   | 1676.25 | 251.05 | 0.32      | 662.05  | 66.21   |
| 2.3 - 3.7                                                              | 3.7  | 1.4     | 357   | 780   | 2.18   | 1692.77 | 215.74 | 0.37      | 590.05  | 59.01   |
| 3.7 - 5.3                                                              | 5.3  | 1.6     | 354   | 810   | 2.29   | 1708.81 | 214.14 | 0.38      | 591.87  | 59.19   |
| 5.3 - 7                                                                | 7.0  | 1.7     | 388   | 840   | 2.16   | 1724.42 | 259.60 | 0.36      | 708.39  | 70.84   |
| 7 - 8.9                                                                | 8.9  | 1.9     | 418   | 900   | 2.15   | 1754.42 | 306.54 | 0.36      | 835.31  | 83.53   |
| 8.9 - 11                                                               | 11.0 | 2.1     | 440   | 960   | 2.18   | 1782.96 | 345.18 | 0.37      | 943.75  | 94.37   |
| 11 - 13.2                                                              | 13.2 | 2.2     | 446   | 991   | 2.22   | 1797.18 | 357.49 | 0.37      | 981.67  | 98.17   |
| 13.2 - 15.6                                                            | 15.6 | 2.4     | 445   | 990   | 2.22   | 1796.73 | 355.80 | 0.37      | 977.30  | 97.73   |
| 15.6 - 18.1                                                            | 18.1 | 2.6     | 473   | 989   | 2.09   | 1796.27 | 401.88 | 0.35      | 1086.45 | 108.65  |
| 18.1 - 20.9                                                            | 20.9 | 2.7     | 489   | 987   | 2.02   | 1795.36 | 429.31 | 0.34      | 1148.27 | 114.83  |
| 20.9 - 23.7                                                            | 23.7 | 2.9     | 539   | 988   | 1.83   | 1795.82 | 521.72 | 0.29      | 1344.10 | 134.41  |
| 23.7 - 26.8                                                            | 26.8 | 3.0     | 571   | 988   | 1.73   | 1795.82 | 585.51 | 0.25      | 1462.89 | 146.29  |
| 26.8 - 30                                                              | 30.0 | 3.2     | 628   | 989   | 1.57   | 1796.27 | 708.42 | 0.16      | 1646.64 | 164.66  |
| ρ: Densidad natural estimada, G: Módulo de rigidez; E: Módulo de Young |      |         |       |       |        |         |        |           |         |         |



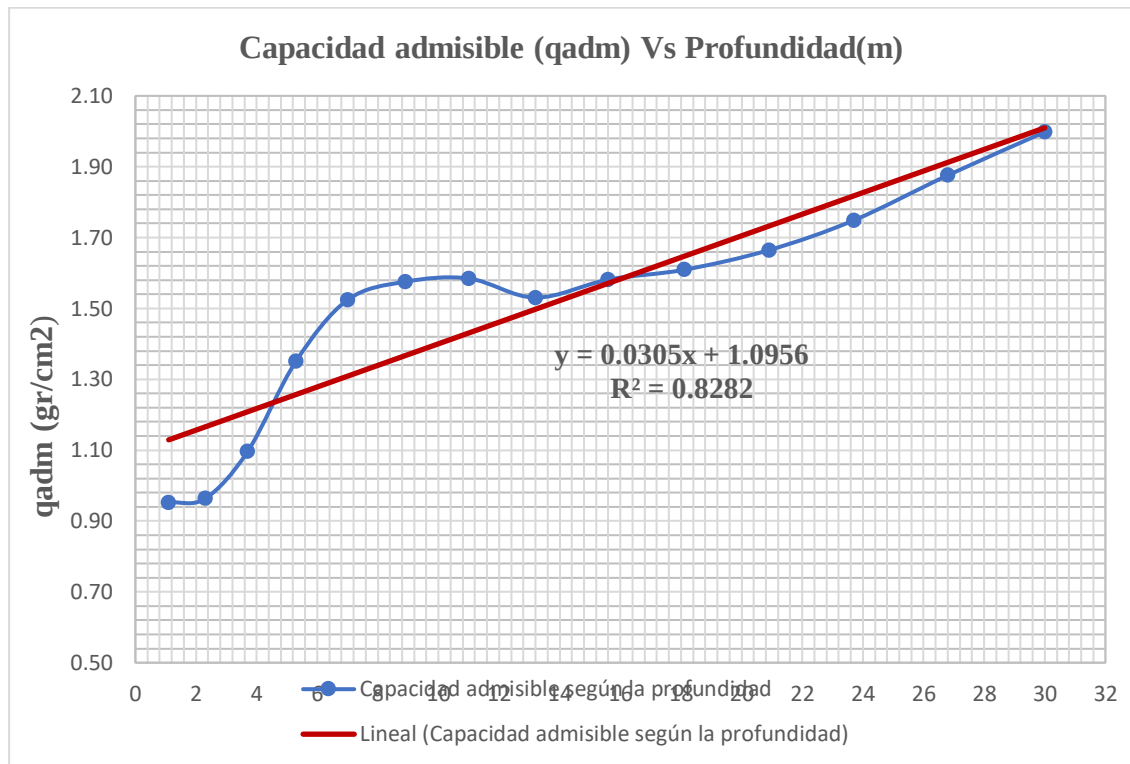






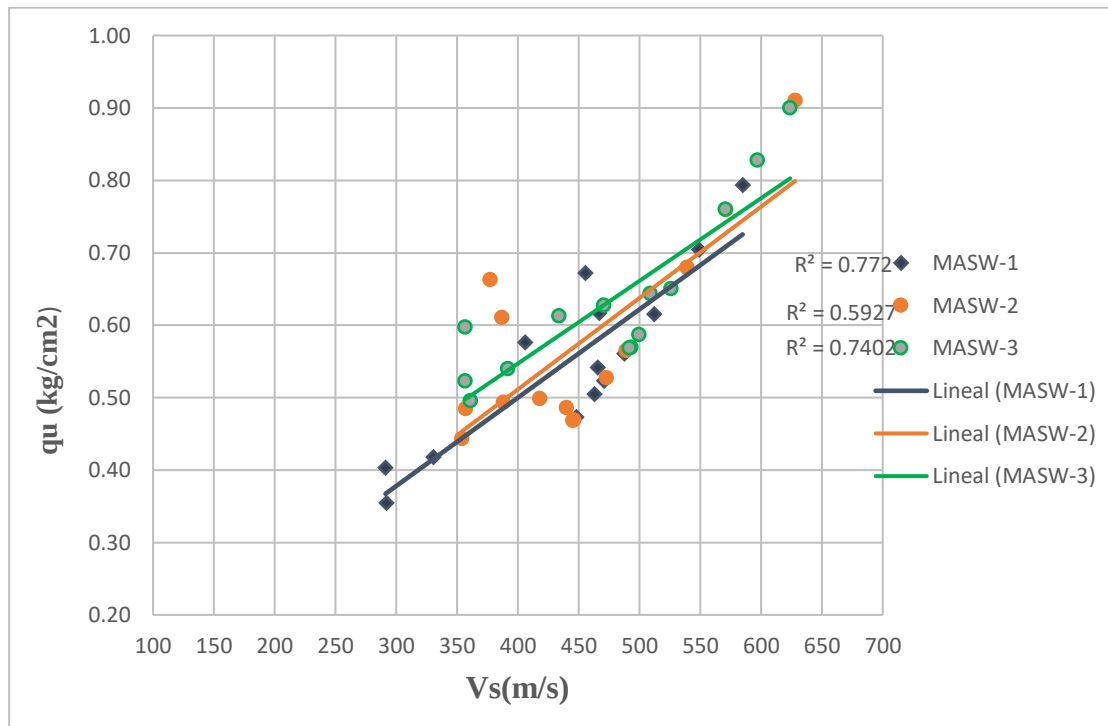
*ANEXO 3: Cálculo de la capacidad admisible*

### Capacidad Admisible (qadm) – MASW -01



| Profundidad (m) | Vs  | Vp  | Y (gr/cm <sup>2</sup> ) | qadm (gr/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------|-----|-----|-------------------------|----------------------------|
| 1.1             | 291 | 700 | 0.1700                  | 0.9525                     |
| 2.3             | 292 | 750 | 0.1714                  | 0.9632                     |
| 3.7             | 331 | 780 | 0.1722                  | 1.0956                     |
| 5.3             | 406 | 810 | 0.1730                  | 1.3511                     |
| 7               | 456 | 840 | 0.1738                  | 1.5241                     |
| 8.9             | 467 | 900 | 0.1753                  | 1.5754                     |
| 11              | 466 | 960 | 0.1768                  | 1.5847                     |
| 13.2            | 448 | 991 | 0.1775                  | 1.5306                     |
| 15.6            | 463 | 990 | 0.1775                  | 1.5814                     |
| 18.1            | 471 | 989 | 0.1775                  | 1.6092                     |
| 20.9            | 487 | 987 | 0.1774                  | 1.6646                     |
| 23.7            | 512 | 988 | 0.1775                  | 1.7488                     |
| 26.8            | 549 | 988 | 0.1775                  | 1.8758                     |
| 30              | 585 | 989 | 0.1775                  | 1.9981                     |

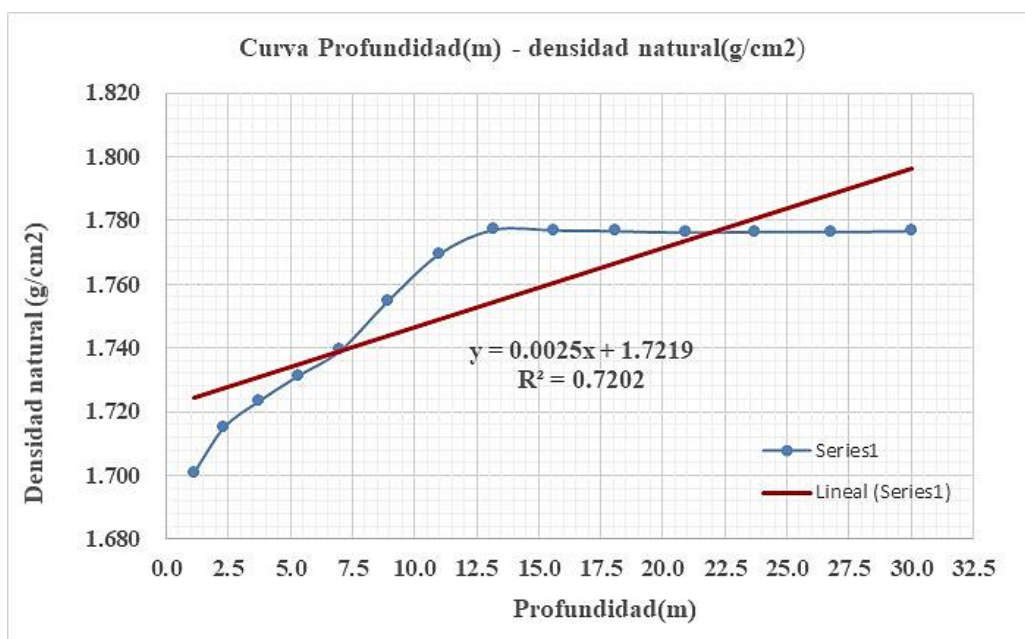
### Capacidad portante ( $q_u$ ) – MASW -01, 02 y 03



| Profundidad (m) | $V_s$ | $V_p$ | $(V_p/V_s)$ | $q_{u-1}(\text{Kg/cm}^2)$ | $q_{u-2}(\text{Kg/cm}^2)$ | $q_{u-3}(\text{Kg/cm}^2)$ |
|-----------------|-------|-------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1.1             | 291   | 700   | 2.404       | 0.4031                    | 0.6630                    | 0.5969                    |
| 2.3             | 292   | 750   | 2.568       | 0.3549                    | 0.6105                    | 0.5226                    |
| 3.7             | 331   | 780   | 2.360       | 0.4179                    | 0.4846                    | 0.4951                    |
| 5.3             | 406   | 810   | 1.996       | 0.5766                    | 0.4434                    | 0.5396                    |
| 7               | 456   | 840   | 1.844       | 0.6722                    | 0.4932                    | 0.6120                    |
| 8.9             | 467   | 900   | 1.928       | 0.6167                    | 0.4985                    | 0.6273                    |
| 11              | 466   | 960   | 2.062       | 0.5420                    | 0.4859                    | 0.6433                    |
| 13.2            | 448   | 991   | 2.213       | 0.4729                    | 0.4692                    | 0.5690                    |
| 15.6            | 463   | 990   | 2.139       | 0.5048                    | 0.4680                    | 0.5679                    |
| 18.1            | 471   | 989   | 2.100       | 0.5231                    | 0.5274                    | 0.5870                    |
| 20.9            | 487   | 987   | 2.025       | 0.5609                    | 0.5645                    | 0.6497                    |
| 23.7            | 512   | 988   | 1.930       | 0.6154                    | 0.6796                    | 0.7595                    |
| 26.8            | 549   | 988   | 1.799       | 0.7044                    | 0.7595                    | 0.8275                    |
| 30              | 585   | 989   | 1.691       | 0.7937                    | 0.9104                    | 0.8993                    |

*ANEXO 4: Perfiles de densidad en base a velocidad onda P*

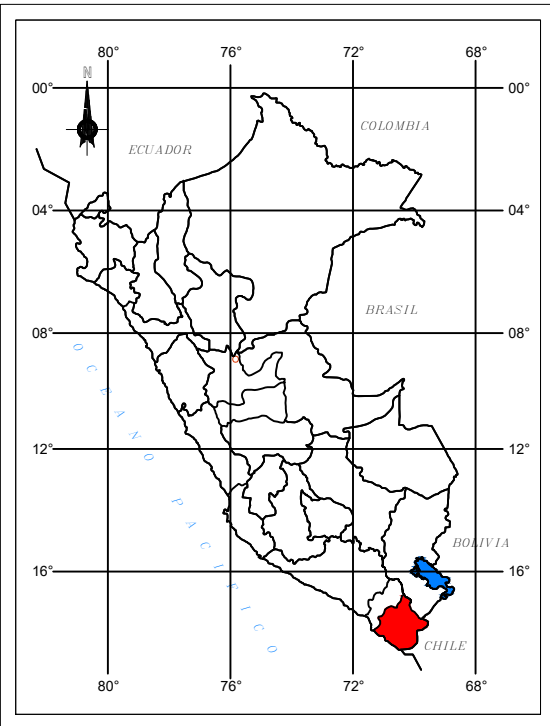
### Curva Profundidad(m) - densidad natural (g/cm2)



| Prof.       |      | Espesor | Vs    | Vp    | Vp /Vs | $\rho$               |
|-------------|------|---------|-------|-------|--------|----------------------|
| (m)         |      | (m)     | (m/s) | (m/s) |        | (Kg/m <sup>3</sup> ) |
| 0 - 1.1     | 1.1  | 1.1     | 377   | 700   | 1.86   | 1.701                |
| 1.1 - 2.3   | 2.3  | 1.2     | 387   | 750   | 1.94   | 1.715                |
| 2.3 - 3.7   | 3.7  | 1.4     | 357   | 780   | 2.18   | 1.723                |
| 3.7 - 5.3   | 5.3  | 1.6     | 354   | 810   | 2.29   | 1.731                |
| 5.3 - 7     | 7.0  | 1.7     | 388   | 840   | 2.16   | 1.739                |
| 7 - 8.9     | 8.9  | 1.9     | 418   | 900   | 2.15   | 1.755                |
| 8.9 - 11    | 11.0 | 2.1     | 440   | 960   | 2.18   | 1.770                |
| 11 - 13.2   | 13.2 | 2.2     | 446   | 991   | 2.22   | 1.777                |
| 13.2 - 15.6 | 15.6 | 2.4     | 445   | 990   | 2.22   | 1.777                |
| 15.6 - 18.1 | 18.1 | 2.6     | 473   | 989   | 2.09   | 1.777                |
| 18.1 - 20.9 | 20.9 | 2.7     | 489   | 987   | 2.02   | 1.776                |
| 20.9 - 23.7 | 23.7 | 2.9     | 539   | 988   | 1.83   | 1.777                |
| 23.7 - 26.8 | 26.8 | 3.0     | 571   | 988   | 1.73   | 1.777                |
| 26.8 - 30   | 30.0 | 3.2     | 628   | 989   | 1.57   | 1.777                |

*AANEXO 5: Perfil Longitudinal de Análisis multicanal de onda superficiales*





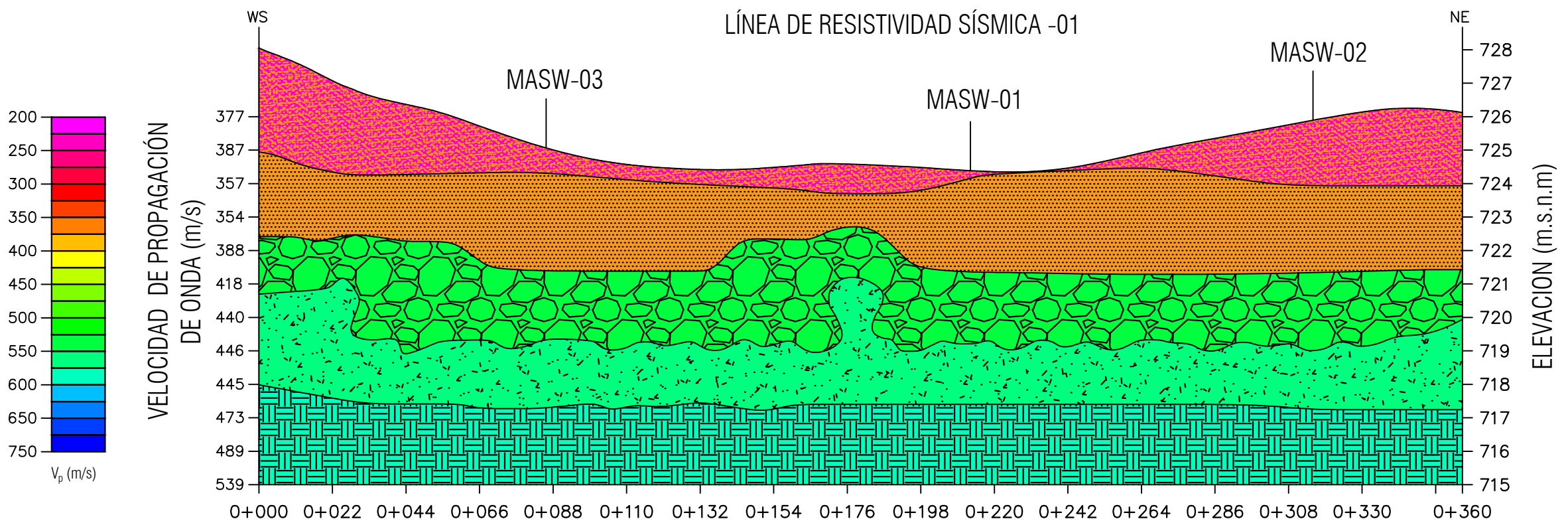
MAPA DEPARTAMENTAL DEL PERÚ



MAPA REGIONAL TACNA



PERFIL LONGITUDINAL ESC: 1/20



UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA



PROYECTO

"CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE SUELOS MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS CON FINES DE CIMENTACIONES EN LA ASOCIACIÓN NIESE - LLACSA EN EL DISTRITO DE CIUDAD NUEVA - TACNA, 2024."

ESCALA INDICADA FECHA FEBRERO - 2025

PLANO

PLANO UBICACION DE ENSAYOS GEOFÍSICOS

ESPECIALIDAD ESTUDIO GEOFÍSICO

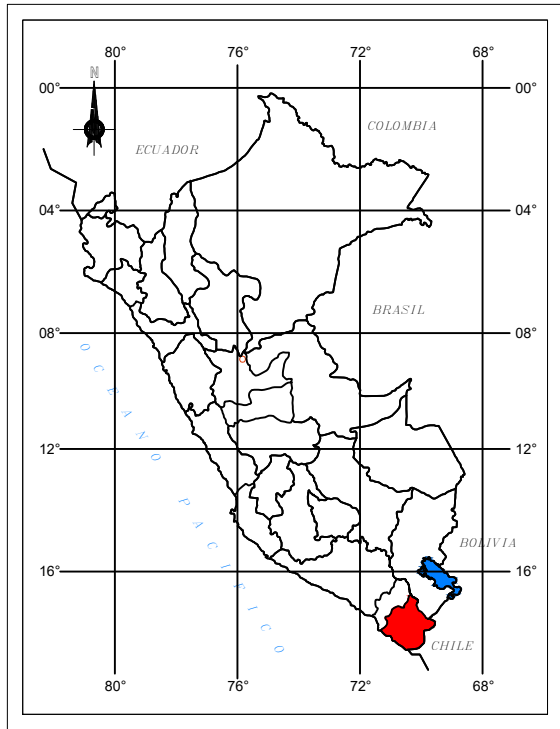
RESPONSABLE

ING. Hernán Escobar Rivera

CÓDIGO

PU-01





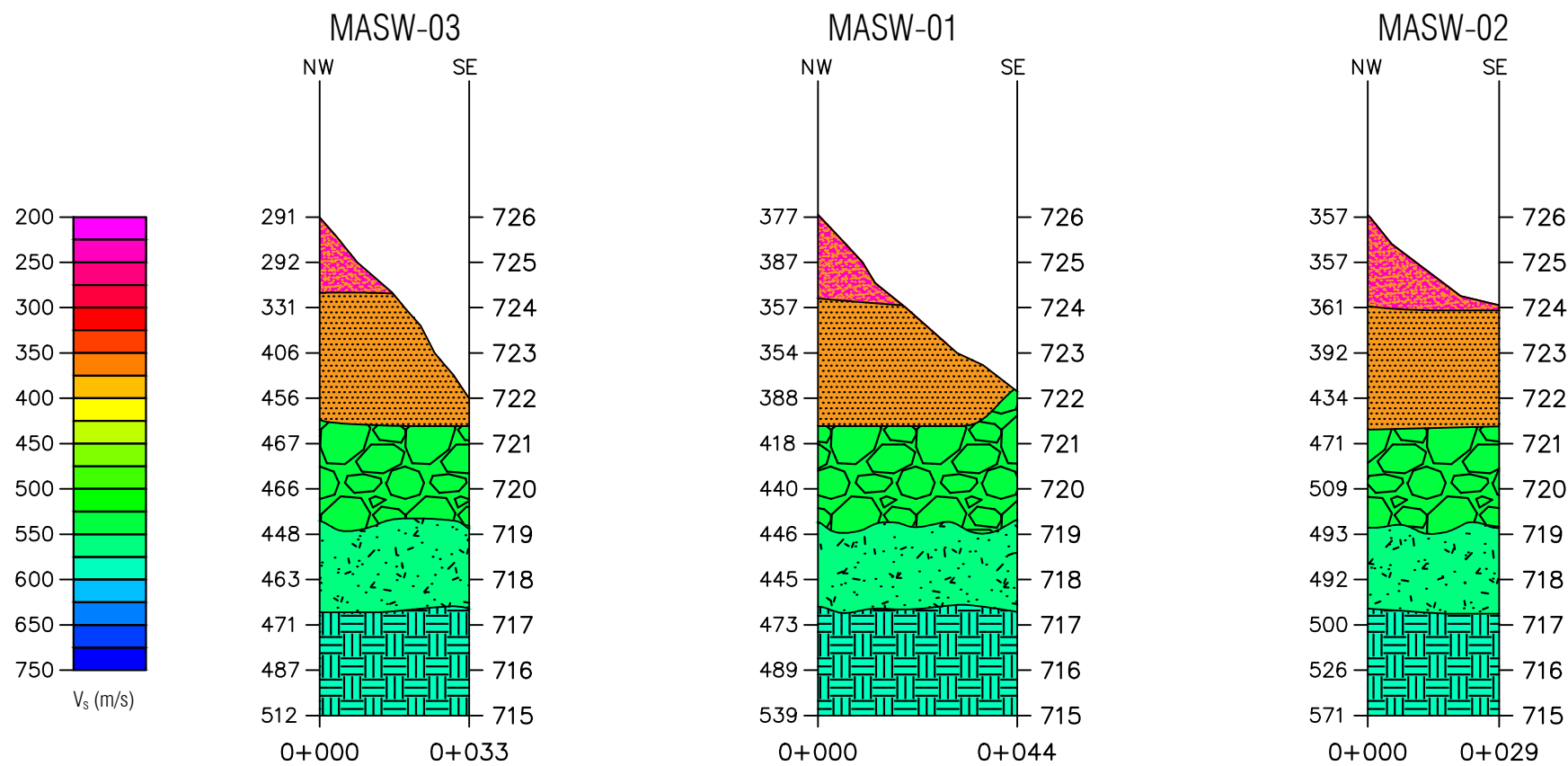
MAPA DEPARTAMENTAL DEL PERÚ



MAPA REGIONAL TACNA



PERFIL LONGITUDINAL ESC: 1/20



UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA



PROYECTO  
"CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE SUELOS MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS CON FINES DE CIMENTACIONES EN LA ASOCIACIÓN NIESE - LLACSA EN EL DISTRITO DE CIUDAD NUEVA - TACNA, 2024."

ESCALA  
INDICADA

FECHA  
FEBRERO - 2025

PLANO  
UBICACION DE ENSAYOS GEOFÍSICOS

ESPECIALIDAD  
ESTUDIO GEOFÍSICO

RESPONSABLE  
ING. Hernán Escobar Rivera

CÓDIGO  
PU-01



*ANEXO 6: Panel Fotográfico*

*Foto 1. Línea de Refracción Sísmica LRS-01*



*Foto 2. Sondeo MASW-01*



Foto 3. Sondeo MASW-02



Foto 4. Sondeo MASW-03



## **APENDICE**

*APÉNDICE 1:Matriz de consistencia del informe final de tesis.*

**MATRIZ DE CONSISTENCIA - PROYECTO DE INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA.**

| PROBLEMA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | OBJETIVOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | HIPÓTESIS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | VARIABLES E INDICADORES                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | METODOLOGÍA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>1) Interrogante General</b><br/>¿Es posible la caracterización geotécnica de suelos mediante métodos geofísicos con fines de cimentaciones en la Asociación Neiser - Llacsá en el distrito de Ciudad Nueva -Tacna, 2024?</p> <p><b>2) Interrogante Específica</b><br/>1.-¿Es posible examinar el perfil del subsuelo mediante el sondeo de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW-1D) y refracción sísmica?</p> | <p><b>1) Objetivo General</b><br/>Determinar la caracterización geotécnica de suelos mediante métodos geofísicos con fines de cimentaciones en la Asociación Neiser - Llacsá en el distrito de Ciudad Nueva -Tacna, 2024.</p> <p><b>2) Objetivo Específico</b><br/>1. Estimar el perfil del subsuelo mediante el sondeo de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW-1D).</p> | <p><b>1) Hipótesis General</b><br/>Es posible determinar la caracterización geotécnica de suelos mediante métodos geofísicos con fines de cimentaciones en la Asociación Neiser - Llacsá en el distrito de Ciudad Nueva -Tacna, 2024.</p> <p><b>2) Hipótesis Específica</b><br/>1. Mediante los ensayos de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW-2D) y refracción sísmica permite la caracterización geotécnica del suelo.</p> | <p><b>Variable (I)</b><br/><b>Métodos geofísicos,</b><br/>Ensayo Indirecto:<br/>Refracción sísmica, MASW-1D.</p> <p><b>Variable (D)</b><br/>Caracterización de suelos.<br/>Propiedades Físicas.<br/>Módulos de rigidez<br/>Densidad<br/>Clasificación de suelos (E.030)<br/>Capacidad Admisible.<br/>Capacidad portante.</p> | <p><b>Tipo de Investigación</b><br/>No experimental.<br/>Cualitativo.<br/>De campo.</p> <p><b>Diseño de Investigación</b><br/>Transeccionales<br/>Nivel: Descriptivo</p> <p><b>Población</b><br/>Asociación Neiser Llacsá del distrito de Ciudad Nueva, Tacna 2024.</p> <p><b>Muestra</b><br/>Muestreo no probabilístico de 4 líneas aleatorios.</p> <p><b>Técnicas de Recolección de Datos</b></p> |



| PROBLEMA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | OBJETIVOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | HIPÓTESIS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | VARIABLES E INDICADORES | METODOLOGÍA                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>2.- ¿Se puede determinar las velocidades de las ondas compresionales (Vp) y de corte Vs), mediante métodos geofísicos?.</p> <p>3.- ¿Es posible determinar en forma indirecta a partir de la velocidad de las ondas Vp y Vs, así como el módulo de elasticidad, módulo de corte, módulo volumétrico, coeficiente de Poisson y la capacidad de carga admisible del terreno?</p> <p>4.- ¿Es posible la elaboración de planos de isovalores de la relación Vp/Vs y modulo Poisson para determinar la calidad del suelo con fines de cimentación?.</p> | <p>2. Determinar las velocidades de las ondas Compresionales (Vp) y de corte (Vs), mediante métodos geofísicos.</p> <p>3. Estimar en forma indirecta a partir de la velocidad de las ondas Vp y Vs, así como el módulo de elasticidad, módulo de corte, módulo volumétrico, módulo de Poisson y capacidad de carga.</p> <p>4. Determinar el plano de isovalores de la relación Vp/Vs y modulo Poisson para determinar la capacidad de carga admisible del terreno.</p> | <p>2. Los métodos geofísicos proporcionan los valores de ondas Compresionales (Vp) y de corte (Vs).</p> <p>3. Es posible calcular los parámetros físicos y mecánicas de los suelos mediante método geofísico para cimentación superficial.</p> <p>4. Mediante la relación Vp/Vs y modulo Poisson es posible determinar la calidad del suelo.</p> |                         | <p>Observación MASW-2D, Refracción Sísmica.</p> <p><b>Instrumento:</b></p> <p>Fichas de Observación y recolección de datos.</p> <p>Equipo de Refracción Sísmico.</p> <p>Software especializado.</p> |