



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUBSUELO A
PARTIR DE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS EN
EL ÁREA DE EVAR, NUEVO AMATA – MOQUEGUA

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. YESSY THALIA LAYME ANCHAPURI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO - PERÚ

2022



DEDICATORIA

A mi familia por su apoyo al realizar mis objetivos académicos.

«Lilium»

Os iusti meditabitur sapientiam, et lingua eius loquetur iudicium (...)

La boca del justo meditará la sabiduría, y su lengua dará un juicio (...)

Salmo 37, 30. ««Os iusti»»



AGRADECIMIENTOS

Mi reconocimiento a las personas que hicieron posible realizar este trabajo de investigación. A la Universidad Nacional del Altiplano, Escuela de Ingeniería Geológica, por la formación académica brindada. Al Dr. Ing. Andres Olivera Chura, por su dirección en la realización de esta presente tesis. A los miembros del jurado Dr. Ing. Ernesto Machacca Hanco, M.Sc. Germán Espinoza Rivas, Ing. Mauricio Peralta Molina, por las recomendaciones.

A GEOEXCE SAC, Ing. Elio Cárdenas, por la oportunidad de laborar en su empresa, su apoyo en el inicio de la investigación brindándome pautas e información levantadas en campo. Mi especial agradecimiento al Ing. Michael Jorge, Giancarlo Calcina, Julio Panca, Carlos Fernández por la asesoría en la parte técnica del desarrollo de este proyecto y sugerencias en la aplicación de la geofísica a la geotecnia.

Thalia Layme



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 16

ABSTRACT..... 17

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 19

1.1.1 Definición del problema 19

1.1.2 Formulación del problema..... 22

1.1.3 Justificación del problema 22

1.2 OBJETIVO 23

1.2.1 Objetivo general 23

1.2.2 Objetivos específicos..... 23

1.3 HIPÓTESIS 24

1.3.1 General 24

1.3.2 Específicas 24

1.4 VARIABLES E INDICADORES..... 24



1.4.1 Variable independiente	24
1.4.2 Variable dependiente	24
1.4.3 Indicadores	25

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
2.1.1 Nivel internacional	26
2.1.2 Nivel nacional.....	27
2.1.3 Antecedentes de la zona de estudio	28
2.2 MARCO TEÓRICO	29
2.2.1 Prospección sísmica.....	29
2.2.2 Ondas	30
2.2.3 Ondas sísmicas	30
2.2.4 Leyes de propagación y trayectoria de ondas	33
2.2.5 Sísmica de Refracción	35
2.2.6 Análisis Multicanal de Ondas Superficiales.....	37
2.2.1 Velocidad Sísmica para diferentes materiales	42
2.2.2 Densidades de rocas y suelos	42
2.2.3 Parámetros elásticos del suelo	43
2.2.4 Prospección eléctrica	46
2.2.5 Resistividad de rocas y minerales.....	49
2.2.6 Tomografía de Resistividad Eléctrica	50
2.3 MARCO NORMATIVO.....	53
2.3.1 Peligro sísmico	53



2.3.2 Zonificación sísmica.....	53
2.3.3 Parámetros sísmicos	54
2.3.4 Perfil de suelo	57

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	58
3.1.1 Tipo y método de investigación	58
3.1.2 Población de estudio.....	58
3.1.3 Muestra y diseño muestral.....	59
3.2 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN.....	59
3.2.1 Etapa 1: Revisión de base bibliográfica	59
3.2.2 Etapa 2: Área de estudio.....	59
3.2.3 Etapa 3: Trabajo de campo	60
3.2.4 Etapa 4: Trabajo de gabinete	60
3.3 INSTRUMENTOS	61
3.3.1 Equipo sísmico	61
3.3.2 Equipo Eléctrico	62
3.4 TRABAJO DE CAMPO	63
3.4.1 Disposición de las líneas de prospección	63
3.4.2 Adquisición de datos	64
3.5 TRABAJO DE GABINETE	68
3.5.1 Procesamiento e inversión.....	68
3.5.2 Análisis e integración de datos	75



CAPÍTULO IV

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1 ASPECTOS GENERALES	87
4.1.1 Ubicación.....	87
4.1.2 Acceso	87
4.1.3 Clima	88
4.2 ASPECTO GEOLÓGICO.....	89
4.2.1 Unidad litoestratigráfica	89
4.3 ASPECTO GEOMORFOLÓGICO	94
4.3.1 Unidad geomorfológica	94
4.4 ASPECTO HIDROGEOLÓGICO	97
4.4.1 Unidad Hidrogeológica	97
4.5 ASPECTO GEODINÁMICO.....	100
4.5.1 Erosión de laderas (cárcavas)	100
4.5.2 Deslizamientos	101

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 RESULTADOS.....	103
5.1.1 Perfil unidimensional.....	103
5.1.2 Perfiles Sísmicos	112
5.1.3 Perfil Eléctrico	118
5.2 DISCUSIÓN	127
5.2.1 Peligro Sísmico.....	127
5.2.1 Parámetros elásticos	128



5.2.2 Estratigrafía	131
VI. CONCLUSIONES	133
VII. RECOMENDACIONES	134
VIII. REFERENCIAS	135
ANEXOS.....	141

Área: Geofísica Aplicada.

Línea: Ingeniería Geotécnica.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 28 de abril del 2022.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de adquisición sísmica activa, parámetros geométricos	29
Figura 2. Propagación de una onda armónica.....	30
Figura 3. Dirección de propagación de ondas de volumen.....	31
Figura 4. Dirección de propagación de ondas superficiales	32
Figura 5. Representación gráfica de la ley de Snell.....	33
Figura 6. Representación gráfica del principio de Fermat.....	34
Figura 7. Representación gráfica del principio de Huygens.....	34
Figura 8. Modelo de adquisición por el método refracción sísmica.....	35
Figura 9. Modelo de adquisición en registro multicanal	37
Figura 10. Carácter dispersivo de ondas Rayleigh en un medio heterogéneo	38
Figura 11. Cálculo de la velocidad de fase	40
Figura 12. Procedimiento para el cálculo de la velocidad de fase.....	40
Figura 13. Modelo perfil unidimensional de ondas de corte	41
Figura 14. Desplazamiento de planos paralelos definido por el módulo de rigidez....	44
Figura 15. Desplazamiento o deformación unitaria por el módulo de Young.....	44
Figura 16. Cambio de volumen unitario definido por el módulo de Bulk.....	45
Figura 17. Arreglo tetraelectrónico para TRE	46
Figura 18. Comportamiento de la resistencia de un material	47
Figura 19. Corriente eléctrica a través de un conductor	47
Figura 20. Rango de valores de resistividad para rocas y suelos.....	49
Figura 21. Modelo de adquisición por el método TRE	50
Figura 22. Gráfica de pseudosección aparente, arreglo Polo – dipolo	52
Figura 23. Proceso de inversión de datos geoelectrónicos	53
Figura 24. Mapa de zonificación sísmica de Perú	54



Figura 25. Mapa de valores espectrales USA.....	55
Figura 26. Equipo sísmico	61
Figura 27. Equipo eléctrico.....	62
Figura 28. Disposición de líneas de prospección.....	64
Figura 29. Disposición en campo, línea sísmica LS – 01	65
Figura 30. Adquisición de datos en campo, MASW – 01	66
Figura 31. Registro de datos correspondientes a la línea tomográfica TRE – 01	67
Figura 32. Tiempo de arribo de ondas P	68
Figura 33. Gráfico tiempo – distancia	68
Figura 34. Modelo de velocidades de capa constante.....	69
Figura 35. Modelo de velocidad de ondas P	69
Figura 36. Delimitación tomográfica TRS – 01	70
Figura 37. Registro de ondas de superficie.....	71
Figura 38. Perfil Transformada de Fourier	71
Figura 39. Curva de dispersión	72
Figura 40. Perfil de procesamiento 1D	72
Figura 41. Perfil de depuración de datos malos.....	73
Figura 42. Topografía de la sección eléctrica	73
Figura 43. Sección de resistividades reales	74
Figura 44. Perfil de tomografía de resistividad eléctrica	74
Figura 45. Velocidad de propagación (V_s) en los 30m de estudio	76
Figura 46. Dispersión de velocidades según muestras MASW.....	76
Figura 47. Velocidad de propagación (V_p) en los 30m de estudio.	78
Figura 48. Dispersión de velocidades según muestras LS.....	78
Figura 49. Relación densidad con velocidades de onda P y onda S	80
Figura 50. Perfil de velocidades sísmicas LS 01 – MASW 01.....	81



Figura 51. Perfil de velocidades sísmicas LS 02 – MASW 02.....	82
Figura 52. Perfil de velocidades sísmicas LS 03 – MASW 03.....	83
Figura 53. Perfil de velocidades sísmicas LS 04 – MASW 04.....	84
Figura 54. Probabilidad Normal de muestra.....	85
Figura 55. Curva de regresión ajustada de las variables.....	86
Figura 56. Ubicación y acceso al área de estudio Nuevo Amata.....	88
Figura 57. Mapa geológico local del área de estudio	92
Figura 58. Mapa geomorfológico local del área de estudio.....	96
Figura 59. Mapa hidrogeológico local del área de estudio.....	99
Figura 60. Erosión de laderas cercanas a Nuevo Amata	100
Figura 61. Mapa de peligros geológicos del área de estudio.....	102
Figura 62. Perfil Unidimensional MASW – 01	105
Figura 63. Perfil Unidimensional MASW – 02.....	107
Figura 64. Perfil Unidimensional MASW – 03	109
Figura 65. Perfil Unidimensional MASW – 04.....	111
Figura 66. Perfil Línea Sísmica – 01	113
Figura 67. Perfil Línea Sísmica – 02	115
Figura 68. Perfil Línea Sísmica – 03	117
Figura 69. Perfil Línea Sísmica – 04	118
Figura 70. Perfil Resistividad Eléctrica – 01	121
Figura 71. Perfil Resistividad Eléctrica 01 e Interpretación.....	122
Figura 72. Perfil Resistividad Eléctrica – 02.....	125
Figura 73. Perfil Resistividad Eléctrica 02 e Interpretación.....	126



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propagación de Vp para distintos materiales	42
Tabla 2. Velocidad de propagación de Ondas Compresionales.....	42
Tabla 3. Velocidad de propagación de Ondas de Corte.....	42
Tabla 4. Rango y promedio de densidad para diferentes materiales.....	43
Tabla 5. Fórmulas de sismología módulos y coeficientes	45
Tabla 6. Resistividad de rocas sedimentarias	49
Tabla 7. Factor geométrico de los tipos de arreglos electródicos	51
Tabla 8. Factor de amplificación de suelo	54
Tabla 9. Periodos de vibración de suelo	55
Tabla 10. Coeficiente de sitio para periodos cortos.....	56
Tabla 11. Coeficiente de sitio para periodos largos.....	56
Tabla 12. Clasificación de los perfiles de suelo.....	57
Tabla 13. Clasificación de tipo de suelo	57
Tabla 14. Parámetros de adquisición de ondas P.....	65
Tabla 15. Parámetros de adquisición de ondas S.....	66
Tabla 16. Parámetros de adquisición eléctrica.....	67
Tabla 17. Valores obtenidos del perfil unidimensional MASW.....	75
Tabla 18. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S	76
Tabla 19. Valores obtenidos del perfil Sísmica de Refracción.....	77
Tabla 20. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P	78
Tabla 21. Resultados de los ensayos de densidad LS – 01 y MASW – 01.....	79
Tabla 22. Fórmulas de parámetros elástico dinámicos	80
Tabla 23. Parámetros elásticos de los perfiles LS 01 – MASW 01	81
Tabla 24. Parámetros elásticos de los perfiles LS 02 – MASW 02	82



Tabla 25. Parámetros elásticos de los perfiles LS 03 – MASW 03	83
Tabla 26. Parámetros elásticos de los perfiles LS 04 – MASW 04	84
Tabla 27. Resumen estadístico de regresión	85
Tabla 28. Coordenadas del área de estudio	87
Tabla 29. Vía de acceso al área de estudio	87
Tabla 30. Promedio mensual de lluvia en Puquina.....	88
Tabla 31. Unidad litoestratigráfica local del área de estudio.....	93
Tabla 32. Resumen, parámetros elásticos de los perfiles LS – 01 y MASW – 01	128
Tabla 33. Resumen, parámetros elásticos de los perfiles LS – 02 y MASW – 02	129
Tabla 34. Resumen, parámetros elásticos de los perfiles LS – 03 y MASW – 03	129
Tabla 35. Resumen, parámetros elásticos de los perfiles LS – 04 y MASW – 04	129



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ASCE 7-16: American Society of Civil Engineers.

ASTM: American Standard of Testing Materials.

EVAR: Evaluación de riesgos de desastres originados por fenómenos naturales.

FFT: Transformada de Fourier.

IBC: International Building Codes.

INGEMMET: Instituto Geológico Minero Metalúrgico.

LS: Línea Sísmica.

MASW: Multichannel Analysis of Surface Waves.

N: Norte.

NE: Noreste.

NTP E.030: Norma técnica peruana de diseño sismorresistente.

NW: Noroeste.

SPT: Standard Penetration Test.

TRE: Tomografía de Resistividad Eléctrica.

UTM: Universal Transverse Mercator.

WGS 84: World Geodetic System 1984.

g: Aceleración de la gravedad.

Kg/cm²: Kilogramo por centímetro cuadrado.

m/s: Metros por segundo.

m²: Metro cuadrado

mm: Milímetros.

ms: Milisegundos.

Ohm*m: Ohmio por metro.

S/m: Siemens por metro.



- t/m³**: Toneladas por metro cúbico.
- v**: Coeficiente Poisson.
- Fa**: Coeficiente de Sitio para periodos cortos.
- Fv**: Coeficiente de Sitio para periodos largos.
- σ**: Conductividad (S/m).
- K**: Constante del dispositivo eléctrico (factor geométrico) (m).
- ρ**: Densidad del material.
- f**: Frecuencia.
- Z**: Factor de zona.
- S**: Factor de amplificación de suelo.
- λ**: Longitud de onda.
- λ_r** : Longitud de onda Rayleigh.
- μ**: Módulo de rigidez o de cizalla G.
- K**: Módulo volumétrico o de Bulk.
- E**: Módulo Young o módulo elástico longitudinal.
- G**: Módulo elástico de rigidez o de cizalla.
- n**: Niveles del perfil o factor de separación.
- T**: Período temporal.
- T_P** : Periodo corto que define la plataforma del factor C.
- T_L**: Periodo largo que define el inicio de la zona del factor C.
- R**: Resistencia del material (Ω).
- ρ_a** : Resistividad aparente (Ωm).
- c**: Velocidad de fase.
- V_p**: Velocidad de onda compresional.
- V_s**: Velocidad de onda de corte.
- Vs30**: Velocidad de corte hasta los 30m de profundidad.



RESUMEN

La prospección geofísica en la geotecnia complementa el proceso de determinación de las características dinámicas del subsuelo a partir de métodos no invasivos más aún si se refiere a estudios previos, resultando una herramienta eficiente y accesible. Nuestro caso de estudio se realizó en el área definida para reubicación según la evaluación de riesgos de desastres originados por fenómenos naturales conocida como Nuevo Amata, ubicado a 1 km al sureste del poblado central de Amata, en una ladera de montaña que pertenece al distrito de Coalaque, Provincia General Sánchez Cerro, Región Moquegua. Esta investigación tuvo como objetivo realizar la caracterización geotécnica del subsuelo a una profundidad de 30 metros de acuerdo a los códigos sísmicos establecidos, mediante la aplicación de la Sísmica de Refracción, Análisis Multicanal de Ondas Superficiales y Tomografía de Resistividad Eléctrica, que ayude en el cumplimiento de las condiciones mínimas para el diseño sismorresistente de las edificaciones proyectadas. El trabajo como método de investigación cuantitativa se realizó en etapas de diseño y adquisición, procesamiento e interpretación de datos geofísicos: La etapa de campo se llevó a cabo con el diseño y la adquisición de datos para 3 líneas de RS, 4 puntos MASW y 2 líneas de TRE, mientras la etapa de gabinete se realizó con el procesamiento de los registros sísmicos y eléctricos, realizándose de forma independiente y empleando los softwares SeisImager, Res2dInv. Se obtuvo como resultado la velocidad de ondas P (V_p) en el rango de 500 – 1441 m/s, velocidad de ondas S (V_s) 174 – 601 m/s, respectivamente; las resistividades varían en el rango de 12 – 400 Ohm*m. Concluyendo con, los módulos dinámicos: Módulo de Corte 563.3 – 6915.0 Kg/cm²; Módulo de Young 1634.7 – 18242.5 Kg/cm²; Módulo Volumétrico 2431.8 – 22657.9 Kg/cm²; Densidad aparente 1.8 – 1.9 Tn/m³; Relación de poisson μ 0.28 – 0.38 y el Parámetro Dinámico fundamental, velocidad de propagación de onda cortante en los primeros 30 metros de investigación (V_{s30}) 428 m/s.

Palabras Clave: Caracterización geotécnica, Refracción sísmica, Resistividad eléctrica.



ABSTRACT

Geophysical prospecting in geotechnical engineering complements the process of determining the dynamic characteristics of the sub-soil from non-invasive methods, even more if it refers to previous studies, resulting in an efficient and accessible tool. Our case study was carried out in the area defined for relocation according to the Evaluation of Disaster Risks Originated by Natural Phenomena known as Nuevo Amata, located 1 km southeast of the central town of Amata, on a mountain slope belonging to the district of Coalaque, General Sanchez Cerro Province, Moquegua Region. The objective of this research was to carry out the geotechnical characterization of the subsoil at a depth of 30 meters according to the established seismic codes, through the application of Seismic Refraction, Multichannel Analysis of Surface Waves and Electrical Resistivity Tomography, to help in the fulfillment of the minimum conditions for the seismic-resistant design of the projected buildings. The work as a quantitative research method was carried out in stages of design and acquisition, processing and interpretation of geophysical data: The field stage was carried out with the design and acquisition of data for 3 RS lines, 4 MASW points and 2 TRE lines. The cabinet stage was carried out with the processing of the seismic and electrical logs, performed independently and using SeisImager, Res2DInv, Res2DInv software's, giving as a result, P wave velocity (V_p) in the range of 500 – 1441 m/s, S wave velocity (V_s) 174 – 601 m/s, respectively. While the resistivities vary in the range of 12 – 400 Ohm*m. The dynamic moduli were also obtained: Shear Modulus 563.3 – 6915.0 Kg/cm², Young's Modulus 1634.7 - 18242.5 Kg/cm², Volumetric Modulus 2431.8 – 22657.9 Kg/cm², Apparent Density 1.8 – 1.9 Tn/m³, Poisson's Ratio μ 0.28 – 0.38 and the fundamental dynamic parameter, shear wave propagation velocity in the first 30 meters of investigation (V_{s30}) 428m/s.

Keywords: Geotechnical characterization, Seismic Refraction, Electrical Resistivity.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El estudio tiene como finalidad conocer a detalle el subsuelo en los primeros 30 metros de profundidad mediante el uso de métodos geofísicos indirectos, permitiendo obtener los parámetros físicos elásticos o constantes elásticas dinámicas y parámetros sísmicos que incluye la clasificación de suelo de acuerdo a los códigos sísmicos establecidos por la International Building Codes IBC-ASCE 7, 2018; Norma Peruana E.030 Diseño Sismorresistente, 2018. Además de evaluar y definir los estratos del subsuelo, así como la consolidación y los espesores probables de los mismos.

En este caso la investigación del subsuelo se realiza debido a constantes eventos geodinámicos que se presentan como riesgo geológico para los habitantes. Medina (2014) indica que, el área de EVAR propuesta para reubicación está asociado a movimientos en masa, mismos que, representan procesos geológicos superficiales, involucrando la remoción de masas rocosas con características inestables, depósitos consolidados de diferente origen, competencia y grado de cohesión, o la combinación de ambos, por efecto de la gravedad.

La aplicación de los métodos geofísicos se plantea como soporte para el estudio geotécnico previo, teniendo en cuenta que la aplicación de ensayos puntuales como el ensayo de penetración estándar tiene una validez increíble y es complementada por los métodos geofísicos indirectos por ser técnicas no destructivas y de investigación extensiva, según plantea Torres (2020).



Se opta por la combinación de métodos sísmicos y eléctricos para el caso de materiales geológicos del lugar, y así obtener buenos resultados a diferentes niveles del subsuelo, conocer sus cambios laterales e identificar el posible nivel freático. Cabe resaltar que la caracterización geotécnica es imprescindible en todo estudio geotécnico preliminar, que ayude como base en la toma de decisiones previa construcción de edificaciones, brindar las características del suelo a cimentar, brindar indicadores para complementar planes de protección civil ante la ocurrencia de sismos severos.

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Definición del problema

En la práctica diaria de la ingeniería geotécnica, la caracterización del subsuelo se realiza desde el aspecto estático y dinámico. La condición dinámica refiere al comportamiento del suelo bajo cargas cíclicas (Singh et al, 2017) dicho de otro modo, la respuesta de masas de suelo durante la aplicación rápida de cargas y es de interés para una amplia gama de problemas, desde las vibraciones de los cimientos hasta la respuesta del sitio durante un terremoto.

Se hace uso de la transmisión de ondas para evaluar las propiedades del terreno, siendo la velocidad de onda de corte (V_s) uno de los parámetros más importantes para la caracterización dinámica de suelos. En el Perú, la caracterización de los suelos en función al (V_{s30}) se encuentra incluida en las regulaciones para el diseño sismorresistente descritas en la norma técnica peruana E.030, misma que está basada en el código de construcción americano IBC/ASCE 7.



Civita di Bagnoregio un pueblo bello de Italia central, situado en la cima de un monte volcánico de peculiares condiciones geológicas, la sismicidad regional y la impresionante afluencia turística hicieron que la ciudad se incluyera en la lista de los 100 lugares más amenazados del mundo. Con el fin de preservar el centro histórico mejorar su resistencia a los deslizamientos de tierra y a los riesgos sísmicos, con el fin de soportar la seguridad de las vidas humanas (visitantes y residentes) y de los edificios. Cercato et al (2020) llevaron a cabo investigaciones geofísicas de superficie complementadas con la sísmica de pozo y pruebas geotécnicas de laboratorio para proporcionar una caracterización dinámica/cíclica detallada de los litotipos, para investigar los efectos sísmicos del lugar. Entre las técnicas geofísicas (registros de ruido ambiental, métodos de ondas superficiales, tomografía de resistividad eléctrica y sísmica de fondo de pozo) para evaluar la geometría y las propiedades de rigidez de baja deformación de las diferentes unidades geológicas y proporcionar imágenes continuas del subsuelo en toda la zona urbanizada.

En nuestro país existen ambientes con litología variada que son el soporte para la construcción de viviendas, ya sea por su ubicación o extensión. Un caso particular de estudio se centra en los suelos de litología volcánica perteneciente al grupo Sencca en la ciudad de Arequipa, debido al aumento poblacional llevó a la invasión de zonas no exploradas ni determinadas como áreas aptas para urbanización. Villilli, (2018) en su proyecto de investigación menciona la caracterización de estos suelos mediante ensayos de Refracción Sísmica y MASW, donde determinó parámetros dinámicos como los módulos de Rigidez, Young, Bulk y Coeficiente Poisson de los suelos volcánicos, los que permitieron determinar la capacidad admisible y asentamientos diferenciales, con fines de cimentación.



El caso de la localidad de Amata en la región de Moquegua, presenta un área propuesta para reubicación denominado Nuevo Amata de condiciones poco estables para la construcción de viviendas. Según la evaluación de peligros geológicos realizada en esta zona por la Dirección de Geología Ambiental y Riesgos Geológicos INGEMMET, Nuevo Amata viene siendo afectado principalmente por erosión de laderas, fenómeno que se intensifica en suelos representados por depósitos de caída de lapilli pómez y ceniza. Los peligros geológicos identificados en la zona evaluada están condicionados por la naturaleza litológica de la zona, la pendiente de laderas, la geomorfología y la proximidad a centros volcánicos.

Es así como Nuevo Amata un área designada para la construcción de viviendas y sujeto a amenazas geológicas evidentes requiere del conocimiento de las características de sus suelos para poder minimizar daños en las futuras edificaciones o evitar pérdidas materiales. Ávila (2016) según el docente Silva del departamento de ingeniería PUCP “Se puede evitar daños durante la construcción teniendo en cuenta criterios que se deben considerar para proteger las viviendas: Investigación previa de los suelos, la profundidad de excavación, tipo de suelo, controlar los asentamientos y derrumbes. Para ello se realizará la caracterización del subsuelo a partir de métodos geofísicos no invasivos con la finalidad de entregar información necesaria ante un estudio geotécnico detallado, optimizar las evaluaciones de análisis sísmicos en estructuras sismorresistentes.

Finalizando este apartado es importante resaltar que las normativas de diseño sismorresistente disponen condiciones mínimas para que las edificaciones diseñadas según sus requerimientos tengan un comportamiento sísmico acorde con los principios de diseño. Se emplea al diseño de todas las edificaciones nuevas y a la reparación de las que resulten dañadas por acción de los sismos, adicionalmente a la prevención asociada.



1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1 *Problema general*

El escenario de estudio permite proponer la siguiente interrogante: ¿Cuáles son las características físicas, dinámicas, de los suelos que componen el área de EVAR, área propuesta para la reubicación del poblado de Amata?

1.1.2.2 *Problemas específicos*

- ¿Cuál es el valor promedio de la velocidad de onda de corte para los 30 metros más superficiales del área de estudio?
- ¿Cuáles son las constantes elásticas dinámicas del subsuelo?
- ¿A qué profundidad se encuentra el basamento rocoso?
- ¿Existen anomalías de resistividad en los estratos del subsuelo?

1.1.3 Justificación del problema

Esta investigación aportará con el reconocimiento geotécnico preliminar del área de EVAR conocida como Nuevo Amata a partir de técnicas geofísicas exponiendo las principales características físicas, dinámicas del subsuelo y en cumplimiento de las normativas de diseño sismorresistente establecidas en la prevención de desastres.

Se considera la aplicación de métodos geofísicos indirectos como base para un estudio geotécnico que a futuro permita optimizar con procedimientos convencionales en la realización del número necesario de pozos. Los métodos son rápidos, permiten tratar grandes áreas, ofrecen una forma no destructiva en las mediciones de propiedades geotécnicas, además de ofrecer una forma rentable de investigar las condiciones de un sitio de prueba, ya sea en áreas ambientalmente sensibles o de acceso restringido.



Se espera que los resultados del estudio contribuyan en la evaluación del sitio previa construcción de edificaciones por ser un rol fundamental en la optimización de la ingeniería, tanto en términos de costo, como en la prevención de riesgos asociados a las características del mismo. Asimismo, con la finalidad de alcanzar información adecuada y suficiente a los organismos encargados de la planificación urbana del gobierno regional de Moquegua, preparación y respuesta ante la ocurrencia de sismos severos como El Instituto de Defensa Civil, información que, sirva al equipo de EVAR del Gobierno Regional de Moquegua como indicador en la prevención de riesgos de desastres naturales.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo general

Realizar la caracterización geotécnica del subsuelo a una profundidad de 30 metros, de acuerdo a los códigos sísmicos establecidos y a partir de métodos geofísicos indirectos: Sísmica de Refracción, Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) en el área de EVAR, Nuevo Amata.

1.2.2 Objetivos específicos

- Obtener el valor promedio de la velocidad de propagación de ondas de corte para los 30 metros más superficiales del terreno (V_{s30}), generado a partir del método MASW.
- Determinar la velocidad de propagación de ondas compresionales (V_p) y velocidad de propagación de ondas de corte (V_s), a partir del método Sísmica de Refracción y MASW.
- Identificar la máxima velocidad de propagación de ondas (V_p) (V_s) en los perfiles sísmicos, a partir del método Sísmica de Refracción y MASW.
- Determinar la resistividad de los materiales del subsuelo en los perfiles tomográficos, a partir del método de Tomografía Eléctrica.



1.3 Hipótesis

1.3.1 General

Si se realiza la caracterización geotécnica a partir de la aplicación de métodos geofísicos indirectos, permitirá determinar las características físicas, dinámicas, del subsuelo a una profundidad de 30 metros, al igual que su distribución estratigráfica; que finalmente ayude en el cumplimiento de las condiciones mínimas para el diseño sismorresistente de las edificaciones proyectadas en el área de investigación.

1.3.2 Específicas

- Se obtendrá el valor de (V_{s30}) para clasificar el perfil de suelo del área de investigación considerando los códigos sísmicos E.030; IBC.
- Se determinarán las velocidades de propagación de ondas de compresión y de corte para obtener los parámetros elásticos o constantes elástico dinámicos del subsuelo como el módulo de Rigidez (G), módulo de Young (E), coeficiente Poisson (ν).
- Se identificará la máxima velocidad de propagación de ondas (V_p)(V_s) en los perfiles sísmicos para conocer la profundidad del basamento rocoso o un suelo diferenciado.
- Se determinará la resistividad de los materiales para identificar anomalías significativas en el perfil de distribución de estratos del subsuelo.

1.4 Variables e Indicadores

1.4.1 Variable independiente

- Métodos geofísicos (Sísmica de Refracción, MASW y Tomografía de Resistividad Eléctrica).

1.4.2 Variable dependiente

- Características geotécnicas (Propiedades físicas, Propiedades dinámicas).



1.4.3 Indicadores

- Velocidad de propagación de ondas S (m/s).
- Velocidad de propagación de ondas P (m/s).
- Resistividad de materiales (Ohm*m).



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes de la investigación

Se detallan investigaciones y artículos científicos referentes al tema caracterización de sitios mediante la aplicación de los métodos geofísicos: Sísmica de Refracción, Análisis multicanal de ondas superficiales y Tomografía de resistividad eléctrica, a nivel internacional, nacional e información de los antecedentes de la localidad.

2.1.1 Nivel internacional

Moya et al (2020) Caracterización de Sitio empleando Prospección Geofísica y Geotécnica. Caso de estudio Vía principal Troncal Central del Norte (Ruta Nacional 55) a la altura del Km 68+ 500 en el Municipio de Pamplona, Norte de Santander Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (48), 30-45. Brinda resultados como, (V_p) entre 499m/s y 1714m/s, (V_s) entre 210m/s y 466m/s y resistividades entre 6.06 Ω -m y 581.05 Ω -m., perfiles de suelo Tipo D, compuestos de materiales rígidos, arenas con presencia de arcilla y arcilla limosa saturada.

Cárdenas (2019) Caracterización geotécnica de la formación Mangán, mediante métodos geofísicos - Doctoral dissertation, Universidad de Cuenca. Realizado con el método MASW, Sísmica de Refracción y ensayos de laboratorio convencionales, logrando caracterizar horizontes estratigráficos de baja profundidad, los valores de, V_s para suelos Limo-Arenosos varían en un rango de 167m/s y 272m/s localizados dentro de la profundidad de transmisión de esfuerzos en cimentaciones superficiales.



2.1.2 Nivel nacional

Villilli (2018) Caracterización geotécnica de los suelos del volcánico Sencca, mediante refracción sísmica y análisis de ondas superficiales (MASW), en el AAHH Villa Florida del Distrito de Yura – Arequipa. Determinó la velocidad de propagación de las ondas sísmicas P que varía de 367.80 a 561.40 m/s, mientras que la onda S varían 246.50 a 393.27 m/s, además de obtener parámetros: Módulo “G” de 96.90 – 231.60 MPa; Módulo “E” valores entre 214.40 – 478.40 MPa; Módulo “K” oscila entre 62.00 – 323.20 MPa y el Coeficiente “v” varía de 0.011 a 0.336.

Tavera y Bernal (2020) Estudio geofísico de los acantilados de la Costa Verde en el Distrito de Magdalena del Mar. Evalúan el comportamiento dinámico del suelo usando técnicas geofísicas como el método de resistividad eléctrica, gravimetría, métodos sísmicos (refracción, MASW, MAM) y razones espectrales. Obtienen a lo largo del acantilado, los valores de velocidades de ondas V_p (350-1000 m/s) y V_s (240 a 400 m/s), estos definen suelos menos consistentes con espesores del orden de 10 a 20 metros, estando los de mayor espesor por el parque Castagnola (área del reciente deslizamiento), Puericultorio Pérez Aranibary por el conjunto residencial Marbella.

Cuno (2021) Caracterización del subsuelo para la cimentación de estructuras usando métodos de prospección geofísica en los terrenos de la corte superior de justicia de Arequipa – Perú. Obtuvo resistividades de 1.2 Ωm a 5200 Ωm y de velocidades de onda P de 250 m/s a 1600 m/s, además delimitó tres estratos, el primer material aluviales, el segundo Tufos volcánicos de matriz areno arcillosa del Volcánico Sencca, el tercer estrato Tufos volcánicos, estos presentan fisuras que propician un posible flujo de agua a través de esta estructura, el espesor de este estrato, se estima la existencia de una base sólida a los 38 metros de profundidad.



2.1.3 Antecedentes de la zona de estudio

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Soncco y Vela (2019) Aportan con la evaluación de peligros geológicos de la zona propuesta para reubicación en el sector de Amata (N.O A6935). El informe contiene observaciones realizadas en la zona propuesta para reubicación en Amata, provincia General Sanchez Cerro, Moquegua. En el área de estudio, afloran rocas de la Formación Cachios compuestas por capas de arcillitas muy deleznable. Estas rocas son inestables ante la infiltración de aguas.

COEN-INDECI (2020). Informe precipitaciones pluviales en el departamento de Moquegua N° 66, 2018 C INDECI. Reporta la ocurrencia de intensas precipitaciones que se registran en la región Moquegua, siendo los siguientes eventos de emergencia: provincia General Sanchez cerro, distrito de Coalaque, el 26 de abril de 2020, a las 22:45 horas, se produjo un deslizamiento de masa que afectó medios de vida (áreas de cultivo) en el anexo Amata, distrito de Coalaque, provincia de General Sánchez Cerro.

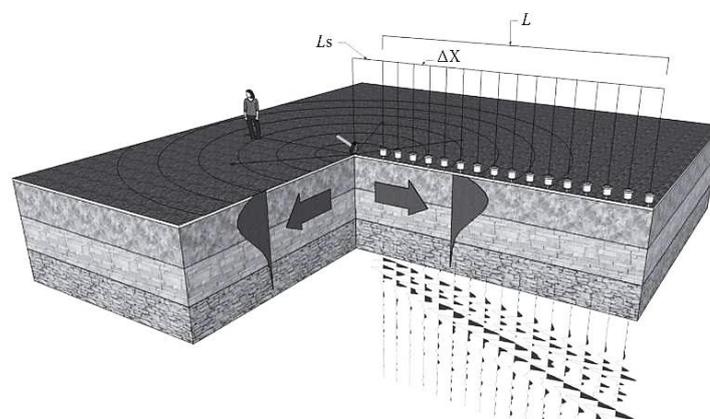
2.2 Marco teórico

2.2.1 Prospección sísmica

La prospección sísmica alberga los métodos de exploración indirecta como la Refracción Sísmica, Análisis multicanal de ondas superficiales, Análisis de Microtrepidaciones en arreglo multicanal, etc. Mismas que están implementadas en la norma ASTM indicando el ensayo más adecuado según el requerimiento. Los métodos están justificados en la medición de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas que son principalmente ondas compresionales (Ondas P) y ondas de corte (Ondas S) en un medio considerado elástico para un nivel de deformaciones provocado.

Para el modelo sísmico representado en la figura 1, se observa el campo de ondas que se genera en la ubicación de la comba y se toma una muestra a lo largo de la línea sísmica (L) donde se distribuyen los sensores de medición a distancias establecidas sobre la superficie plana del terreno. Foti et al (2015) Afirman que, el parámetro de adquisición tiene que ser diseñado dependiendo del objeto de prueba, la profundidad de investigación deseada y la resolución requerida para capas superficiales.

Figura 1.
Modelo de adquisición sísmica activa, parámetros geométricos



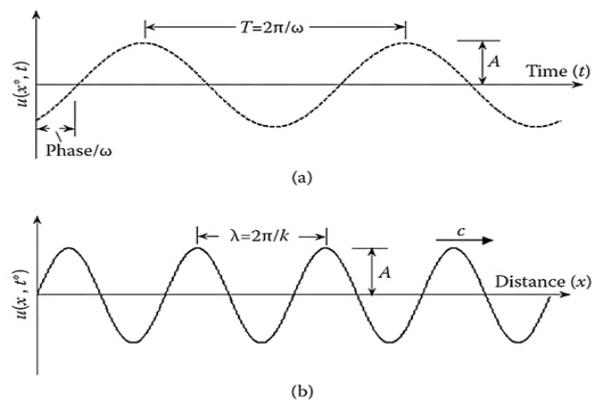
Nota. Modelo de adquisición Sísmica. Tomado de Métodos de ondas superficiales (Foti, 2015).

2.2.2 Ondas

2.2.2.1 Parámetros de ondas

La propagación de una onda monocromática en un punto fijo en el espacio o en un tiempo dado nos faculta definir los parámetros de una onda armónica. La figura 2, representa el movimiento a una distancia x como una función de tiempo, se definen un período espacial o longitud de onda λ y un período temporal T vinculada a la frecuencia angular ω . Tenemos los parámetros a considerar para describir una onda: La frecuencia $f = 1/T$; La frecuencia angular $\omega = 2\pi / T$; Número de onda $k = 2\pi / \lambda$.

Figura 2.
Propagación de una onda armónica



Nota. Propagación a. en función del tiempo, b. en función de la distancia. Tomado de Métodos de ondas superficiales (Foti, 2015).

2.2.3 Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son tramos de energía de deformación elástica que se propagan desde una fuente sísmica (como un terremoto medio natural o un golpe medio artificial). Se utilizan en refracción, como resultado de una perturbación artificial instantánea, conocida como impulso sísmico y busca generar ondas sísmicas (de volumen y superficiales), producidas por un único evento de duración instantánea según mencionan, (Joukowsky, 1950) (Cantos, 1980).

2.2.3.1 Ondas de volumen

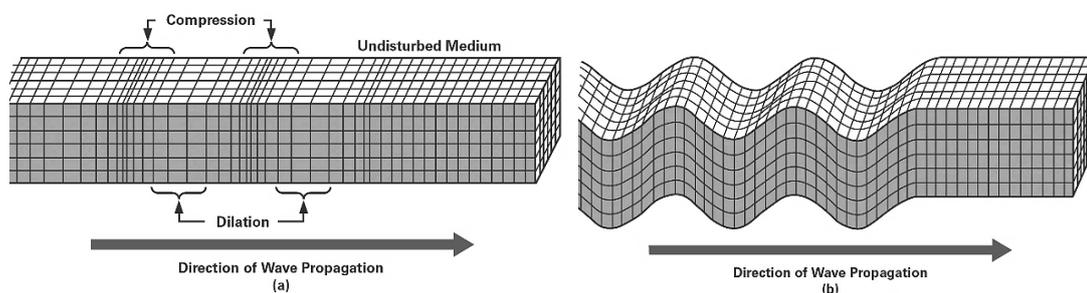
Las ondas de volumen o de cuerpo se propagan en un medio material elástico en cualquier dirección, pueden soportar cambios en su nivel de energía y en su geometría de trayecto, están sujetas a las propiedades físicas del medio y son divididas en dos grupos:

Ondas Sísmicas P: De tipo compresión y dilatación en dirección principal del movimiento ondulatorio, lo que origina una deformación uniaxial cuando atraviesan un cuerpo confinado. Las velocidades de propagación dependen de la densidad y las propiedades elásticas del material a través del cual se propagan.

Ondas sísmicas S: Son ondas de corte y se trasladan en forma transversal al movimiento ondulatorio y el tipo de deformación es senoidal.

Las ondas P son las ondas elásticas más rápidas, 1.73 veces más rápida que las ondas S y, por lo tanto, son detectadas por primero en aplicaciones tales como pruebas ultrasónicas y reflexión sísmica o refracción sísmica (Miller y Pursey 1955). La relación de velocidades de la onda P y la onda S, en cualquier material es función únicamente por el valor del coeficiente de Poisson (ν) para ese material.

Figura 3.
Dirección de propagación de ondas de volumen



Nota. Dirección a. Ondas Primarias, b. Ondas Secundarias. Tomado de Fundamentos de detección sísmica (Santos et al, 2019).

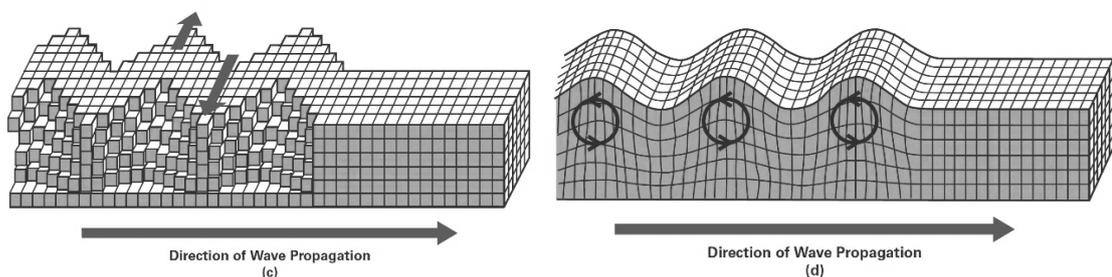
2.2.3.2 Ondas Superficiales

Las ondas superficiales son más pausadas y complejas que las ondas de cuerpo, debido a que son el producto de la evolución de las ondas de cuerpo y son dispersas. Su tiempo de propagación es 20% menor a las ondas S, son de baja frecuencia, y se dividen en dos tipos:

Ondas Superficiales L: Conocidas como ondas *Love*, largas y superficiales, en este tipo de ondas el desplazamiento de las partículas es horizontal y perpendicular a la dirección de propagación (Cantos, 1973). Estas ondas son principalmente ondas de cizalla, para longitudes de onda corta es igual a (V_s) del medio superior y para longitudes de ondas largas es igual a (V_s) del medio inferior.

Ondas Rayleigh R: Se definen por tener velocidades relativamente bajas en comparación con las ondas de volumen, frecuencias bajas y amplitudes altas. La figura 4, muestra el movimiento de las partículas de las ondas Rayleigh, siendo elíptica o retrógrada en un medio homogéneo y la velocidad es aproximadamente 0.9 veces a la (V_s) (Parasnis, 1970).

Figura 4.
Dirección de propagación de ondas superficiales



Nota. Dirección de propagación, c. Ondas Love, d. Ondas Rayleigh. Tomado de Fundamentos de detección sísmica (Santos et al., 2019).

2.2.4 Leyes de propagación y trayectoria de ondas

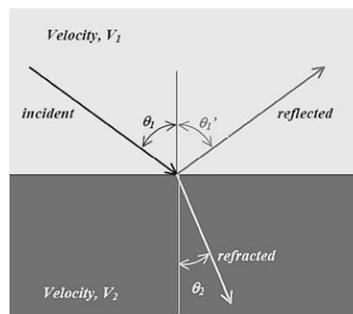
Es importante tener en cuenta los principios básicos para el entendimiento de los métodos sísmicos aplicados como el fenómeno de propagación de ondas. Los principios físicos que rigen la propagación y la trayectoria de las ondas sísmicas en el estudio de refracción, son las mismas que se utilizan en óptica y las definiremos a continuación:

2.2.4.1 Ley de refracción o Snell (holandés, 1621)

Primera ley que se cumple cuando se propaga una onda sísmica e indica “El cambio en la dirección de una onda que pasa de un medio a otro causado por su cambio de velocidad”. Figura 5, la ley establece la relación entre el ángulo de incidencia θ_1 , ángulo reflejado θ_1' , el de refracción θ_2 , según las velocidades de las ondas V_1 y V_2 , en diferentes medios 1 y 2, según:

$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_1'}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2}$$

Figura 5.
Representación gráfica de la ley de Snell



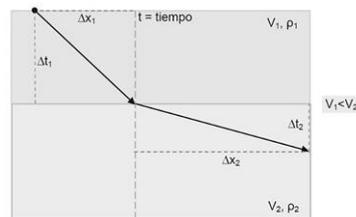
Cuando se cumpla que el ángulo de refracción, $\theta_2 = 90^\circ$; entonces tendremos un ángulo crítico a partir del cual se produzca la refracción total, en la siguiente ecuación:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left[\frac{V_1}{V_2} \right]$$

2.2.4.2 Principio de Pierre Fermat (francés, 1670)

Segunda ley que se cumple cuando se propaga una onda sísmica. Indica que “Todo rayo en un medio sigue la trayectoria donde invierte el menor tiempo”. En un medio homogéneo los rayos sísmicos corresponden a líneas rectas, mientras que en medios estratificados los rayos se comportan como curvas de tiempo mínimo (Cantos, 1973).

Figura 6.
Representación gráfica del principio de Fermat

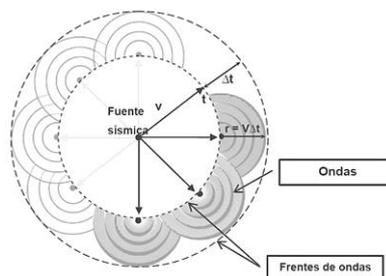


Nota. Principio de Fermat. Tomado de (Cantos, 1973).

2.2.4.3 Principio de Christiaan Huygens (holandés, 1670)

Tercera ley que se cumple cuando se propaga una onda sísmica. Indica que “Cada punto alcanzado por un frente de onda, actúa como origen de un nuevo frente de onda que se extiende en todas las direcciones”. Si el medio es homogéneo el frente de onda es esférico en un momento t , posteriormente un tiempo $t+\Delta$ observado en la figura 7. Cada punto es uno de los frentes de ondas esféricos de $V\Delta t$ (r). Si V es la velocidad del medio, el nuevo frente de ondas, en el instante $t+\Delta t$, será la envolvente de los demás frentes de ondas esféricas menores (Cantos, 1973).

Figura 7.
Representación gráfica del principio de Huygens



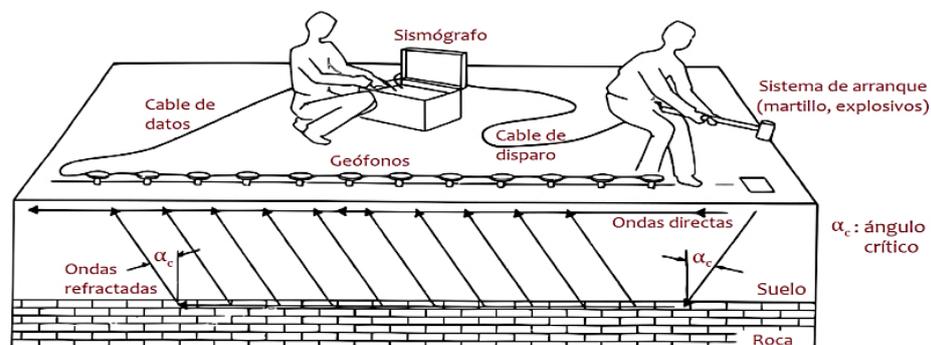
Nota. Principio de Huygens. Tomado de (Cantos, 1973).

2.2.5 Sísmica de Refracción

Método geofísico de gran utilidad siendo el primero en ser practicado en la geotecnia, puede ser utilizado a escala regional o de detalle. El método se basa en el estudio de las ondas elásticas, para determinar en términos de velocidad y espesor, la disposición de las capas en el subsuelo, siendo posible detectar, con un grado elevado de fiabilidad estructuras geológicas en el subsuelo de un área (Lankston, 1989). También ayuda reconocer la posición de un acuífero bajo ciertas condiciones, así como la caracterización de suelos, todo ello de forma indirecta basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que lo conforman.

La adquisición de datos consiste en medir los tiempos de viaje de las ondas de compresión que son generadas de forma artificial a través del impacto de una comba a un soporte sobre la superficie de terreno, esta energía proyectará un frente de onda que será detectado por la distribución longitudinal de geófonos a través de un sismógrafo. Con la información suministrada por esas ondas se construyen los gráficos tiempo/distancia, a partir de los cuales se realiza la interpretación y se obtienen las velocidades y los espesores de las diferentes capas de subsuelo. El método sigue los procedimientos de adquisición recomendados en la norma ASTM D5777.

Figura 8.
Modelo de adquisición por el método refracción sísmica



Nota. Método de refracción sísmica. Tomado de (ASTM D5777, 2011).



2.2.5.1 *Curvas tiempo – distancia*

Según Astier (1975) las curvas tiempo – distancia corresponden a trayectorias refractadas y reflejadas, llamadas respectivamente dromocrónicas e indicatriz. Las curvas se construyen con los tiempos de llegada de los primeros arribos de ondas P en milisegundos a cada uno de los sensores distribuidos en superficie, con referencia al punto de disparo (Rosales, 2000).

2.2.5.2 *Sismograma*

Un sismograma consta de un conjunto de registros sísmicos, que gráficamente se muestran como un grupo de trazas, a cada punto de recepción le corresponde una traza, las trazas poco agitadas antes del impulso señalan la llegada de las ondas directas y refractadas por una perturbación notable.

2.2.5.3 *Principios generales de interpretación*

Una vez construida las curvas tiempo distancia se procede a interpretar la identificación de las domocronas, es la parte más importante de la interpretación de los datos de refracción sísmica, por tanto, los principios generales de interpretación de datos son: Principio de reciprocidad, Principio del tiempo de intercepto en el origen, Principio de paralelismo.

2.2.5.4 *Metodología de cálculo de datos*

De las deducciones generales del método y de los principios, las leyes se originan de los métodos de análisis de las domocronas identificadas siendo los más comunes: tiempos de intercepto, velocidades aparentes, frentes de onda, tiempos de retardo y trazado de rayos. Estos métodos están desarrollados y documentados en libros de geofísica aplicada y algunos han sido implementados en distintos softwares para aligerar los cálculos.

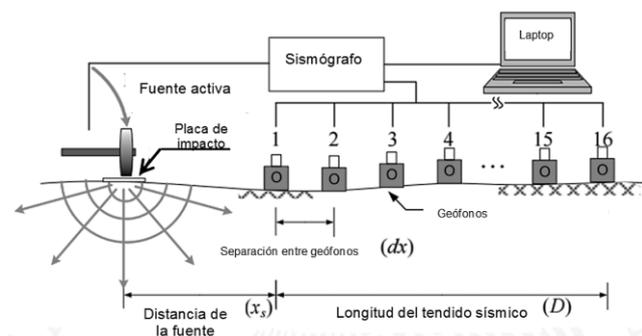
2.2.6 Análisis Multicanal de Ondas Superficiales

Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) originó de la publicación geofísica hecha por Park et al (1999) siendo de uso frecuente en la geotécnica. El método permite obtener el perfil de velocidad de ondas de corte (V_s) hasta profundidades de 25 a 30 metros para la caracterización del sitio, obtener el parámetro V_{s30m} para la clasificación de suelos.

Basado en la interpretación de las ondas superficiales (Ondas Rayleigh) de un sistema de registro multicanal (de 12 o más canales) para estimar la velocidad de la onda S cerca de la superficie (figura 9), la técnica analiza las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los receptores (Park et al., 1999). Las ondas Rayleigh son generadas por una fuente de energía impulsiva localizada a distancias predeterminadas a lo largo de la línea sísmica ubicada sobre la superficie del terreno a investigar.

La (V_s), es reconocida como un factor clave en la caracterización sísmica de una zona debido a que es propiedad dominante de del modo fundamental de la velocidad de fase de las ondas Rayleigh, siendo estas de menor atenuación, alta relación señal/ruido y tener una fuerte inmunidad a la interferencia.

Figura 9.
Modelo de adquisición en registro multicanal



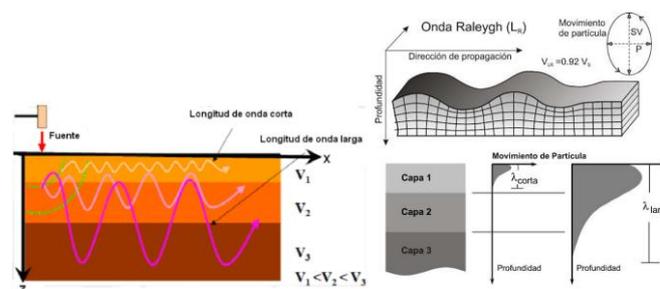
Nota. Modelo de adquisición general MASW tomado de Sahadewa et al. (2012).

2.2.6.1 *Dispersión de ondas Rayleigh*

Se determina dispersión a la variación de velocidades de propagación de las ondas Rayleigh en función de la frecuencia y longitud de onda. Cuando el medio de propagación es homogéneo (V_r) es invariable e independiente de la frecuencia, pero si la rigidez varía con la profundidad como el caso de los medios estratificados cada frecuencia viajará con una velocidad diferente (V_s).

La velocidad de onda S puede ser adquirida invirtiendo la velocidad de fase de la onda superficial, en el caso de un semi espacio sólido y homogéneo, la onda Rayleigh no es dispersiva y viaja con una velocidad aproximada de $0.9194V$ cuando el módulo de Poisson es igual a 0.25 y V es la velocidad de la onda S en el semi - espacio. En consecuencia, mediante la inversión de los datos de dispersión de las ondas Rayleigh de alta frecuencia, se puede adquirir velocidades confiables de onda S cercanas a la superficie.

Figura 10.
Carácter dispersivo de ondas Rayleigh en un medio heterogéneo



Nota. Carácter dispersivo de las ondas Rayleigh. Tomado de (Hayashi, 2003).

2.2.6.2 *Transformada de Fourier FFT*

La aplicación de esta herramienta matemática hace factible el cambio del dominio a un espectro de componentes de frecuencia, el uso de la transformada del campo de onda que se realiza en la geofísica, es acreditado como la herramienta más amplia en el proceso de las ondas superficiales.

Teniendo en cuenta una determinada función continua de solo una variable x (tiempo), la definición matemática de su transformada de Fourier es la siguiente:

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-i\omega t} dt$$

En general $X(\omega)$ es una función de valor complejo.

La razón de la transformación de las mediciones de las ondas superficiales, registradas en la superficie, es que, en el dominio de la frecuencia es más fácil discernir todos los tipos de ondas y separar el conocido *ground roll* del ruido o de las ondas de cuerpo. Ahora, la particularidad es que el *ground roll* está constituido principalmente por ondas *Rayleigh*, de ahí que la transformada de Fourier es una de las herramientas más poderosas para aislar las ondas *Rayleigh* del campo de onda global y poder ser empleado con éxito para estimar experimentalmente la curva de dispersión.

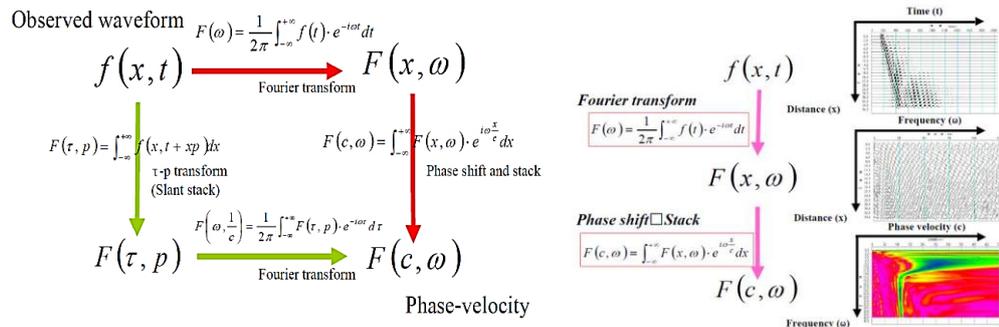
2.2.6.3 Velocidad de fase

La velocidad de fase es la rapidez donde un punto de una fase de ondícula constante viaja en dirección normal a la superficie de la onda en un medio homogéneo, esta es la rapidez de una onda plana que viaja en la misma dirección de tal medio. Adicionalmente una velocidad de fase difiere en la frecuencia, la velocidad de cada frecuencia se denomina velocidad de fase.

Cálculo de la velocidad de fase: Park et al (1999a) proponen una transformación de la forma de onda, llamado Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, que puede calcular la velocidad de fase directamente de un registro sísmico comunes en arreglos multicanal similar al método de McMechan y Yedlin (1981), donde calculan la velocidad aparente (p) en primer lugar y luego la transformaron al dominio de la frecuencia.

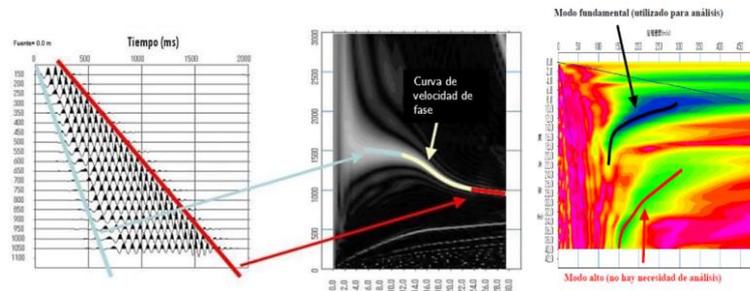
Por el contrario, Park et al (1999a) transforman en primer lugar la acumulación de disparos al dominio de la frecuencia y luego calculan la velocidad de fase mediante el cambio de fase. La figura 11, muestra el esquema de cálculo de la velocidad de fase.

Figura 11.
Cálculo de la velocidad de fase



Nota. En la figura. Izq. Cálculo de la velocidad de la fase, esquema de métodos de transformación. Tomado de (Koichi Hayashi, 2003). Der. Transformadas en dominio de frecuencia – MASW (Koichi Hayashi, 2003).

Figura 12.
Procedimiento para el cálculo de la velocidad de fase



Nota. La figura indica el registro sísmico en el dominio del tiempo y su transformación de velocidad de fase en el dominio de la frecuencia. Tomado de (Koichi Hayashi, 2003).

2.2.6.4 Curva de dispersión

Las curvas de dispersión son un conjunto de curvas que representan la propagación de los modos de onda. La variación de la velocidad de fase con la frecuencia (curva de dispersión) indica si un perfil de suelo es verticalmente homogéneo (un estrato) o verticalmente heterogéneo (medio estratificado). Son exhibidas como la velocidad de fase vs frecuencia, para esta relación se requiere el cálculo de la velocidad de fase, convertir la longitud de onda en función de la frecuencia y velocidad de grupo en función de la frecuencia (Torres, 2020).

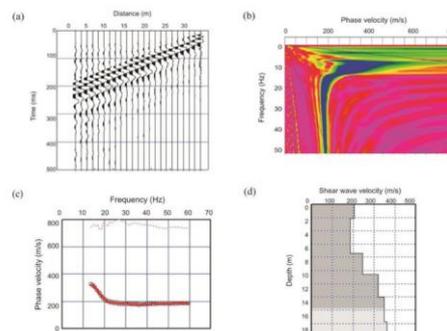
2.2.6.5 Modelo inicial

Un modelo inicial de velocidad del terreno debe ser detallado para el proceso de inversión, a partir del que obtenemos los datos de velocidad de fase observada (f_{obs}). El modelo estratificado del terreno está en función de la frecuencia y de cuatro parámetros del terreno: (V_p), (V_s), (ρ) y el espesor de estratos. Siendo la (V_s) el efecto más importante sobre la fiabilidad de convergencia del algoritmo de inversión. El modelo inicial se construye, al inicio, la longitud de onda se calcula a partir de la frecuencia y la velocidad de fase, continuando, la profundidad se define como 1/3 de la longitud de onda y se representa en el gráfico de velocidad versus la profundidad con su respectiva velocidad de fase como se observa en la figura 13.

2.2.6.6 Inversión de datos

Los cálculos se basan en la teoría de la propagación de la onda, suponiendo un modelo terrestre en capas (Xia et al., 1999). En general, un problema inverso consiste en estimar el conjunto de parámetros que describen el depósito de suelo, en base a una curva de dispersión experimental. Por lo tanto, se deben usar métodos iterativos que determine una *curva de dispersión teórica* para un modelo de una dada capa y se compare con la curva de dispersión experimental obtenida previamente.

Figura 13.
Modelo perfil unidimensional de ondas de corte



Nota. Modelo final o perfil unidimensional de ondas de corte – MASW (Koichi Hayashi, 2003).

2.2.1 Velocidad Sísmica para diferentes materiales

El método de refracción sísmica se desarrolla de acuerdo a la Norma establecida por la Institución Internacional Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM – D5777), en las siguientes tablas, los valores de propagación (V_p) (V_s) para diferentes tipos de materiales.

Tabla 1.
Propagación de V_p para distintos materiales

Descripción	Velocidad V_p (m/s)
Suelo intemperizado	240 - 610
Grava o arena seca	460 - 915
Arena saturada	1220 - 1830
Arcilla saturada	910 - 2750
Agua	1430 - 1665
Arenisca	1830 - 3960
Esquisto, arcilla esquistosa	2750 - 4270
Caliza	2134 - 6100
Granito	4575 - 5800
Roca metamórfica	3050 - 7000

Nota. Velocidad (V_p) de materiales. Tomado de Norma ASTM-D5777

Tabla 2.
Velocidad de propagación de Ondas Compresionales

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

Nota. Velocidad (V_p) de materiales. Tomado de (Martínez, 1990)

Tabla 3.
Velocidad de propagación de Ondas de Corte

Descripción	Velocidad V_s (m/s)
Limo	210
Arcilla	350
Arena	450
Arena Fina	460
Arena Media	600
Arena Gruesa	300
Arena Marina	360
Grava	510

Nota. Velocidad (V_s) de materiales. Tomado de CISMID

2.2.2 Densidades de rocas y suelos

Tabla 4.
Rango y promedio de densidad para diferentes materiales

Tipo de Roca	Rango (g/cm ³)	Promedio (g/cm ³)
Sedimentos		
Regolito	-	1.92
Suelo	1.2 - 2.4	1.92
Arcilla	1.63 - 2.6	2.21
Grava	1.7 - 2.4	2.0
Arena	1.7 - 2.3	2.0
Rocas Sedimentarias		
Arenisca	1.61 - 2.76	2.35
Lutitas	1.77 - 3.2	2.40
Limolitas	1.93 - 2.90	2.55
Dolomita	2.28 - 2.90	2.70
Rocas Sedimentarias (Prom.)	-	2.50

Nota. Densidad para materiales. Tomado de (Telford et al, 2001)

2.2.3 Parámetros elásticos del suelo

Para comprender el proceso de deformación elástica, es necesario el entendimiento de las magnitudes elásticas, establecidas por las leyes de la física. Para ello se describen los parámetros elásticos o constantes elásticas en función a la velocidad de propagación.

2.2.3.1 Coeficiente Poisson (ν)

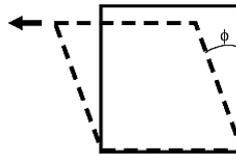
Es la relación entre los cambios unitarios de área de la sección transversal y la deformación longitudinal, en el caso de materiales elásticos entre los siguientes valores $0 < \nu < 0.5$ (Cantos, 1987). La velocidad de propagación de las ondas sísmicas está relacionada con las propiedades elásticas del medio de propagación; entonces, la Relación de Poisson queda dada como:

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

2.2.3.2 Módulo de rigidez o de cizalla (G)

Este módulo determina la resistencia de los materiales a cambiar de forma sin modificar su volumen, por lo que se mide determinando el desplazamiento relativo de planos paralelos por el ángulo ϕ en el que giraría un plano normal a la fuerza (Cantos, 1987).

Figura 14.
Desplazamiento de planos paralelos definido por el módulo de rigidez



En términos de velocidades sísmicas tenemos:

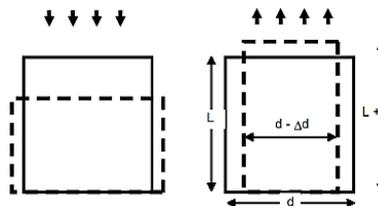
$$G = \rho V_s^2$$

Dónde ρ : Densidad del material; V_s : Velocidad de onda S

2.2.3.3 Módulo Young o módulo elástico longitudinal (E)

Permite caracterizar el comportamiento de un material cuando se aplica esfuerzo de tensión o de compresión en el que se origina una deformación unitaria del material (Martínez, Uzuaga, 1997).

Figura 15.
Desplazamiento o deformación unitaria definido por el módulo de Young



Expresada en términos de velocidades sísmicas tenemos:

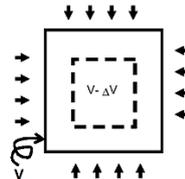
$$E = 2 V_s^2 \rho(1 + \nu)$$

Dónde ρ : Densidad del material; ν : Coeficiente Poisson

2.2.3.4 Módulo volumétrico o de Bulk (K)

Determina la resistencia de los materiales al cambio de volumen, sin variación de forma (Cantos, 1987).

Figura 16.
Cambio de volumen unitario definido por el módulo de Bulk



Expresada en términos de (V_p) y (V_s) tenemos:

$$K = V_p^2 \cdot \rho - \frac{4 \cdot V_s^2 \cdot \rho}{3}$$

2.2.3.5 Velocidad de ondas para el cálculo de parámetros elásticos

La mayoría de los proyectos de ingeniería geotécnica se ocupan de la rigidez del material, tanto los enfoques convencionales como los modernos se están utilizando actualmente para este propósito, la definición más precisa de rigidez debe incluir tanto módulos de Young como de Rigidez, según la teoría de la elasticidad (Sheriff y Geldart, 1982).

Tabla 5.
Fórmulas de sismología módulos y coeficientes

Nombre, Simbología, Unid. Mpa	Definición	Fórmula	En función de Vs
Coefficiente de Poisson (ν)	$\frac{\epsilon_\alpha \text{ Transversal}}{\epsilon_l \text{ Longitudinal}}$	$\nu = \frac{3k - 2G}{2(3K - G)}$	$\frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$
Módulo de Rigidez (G)	$\frac{\sigma \text{ cizalla}}{\epsilon \text{ cizalla}}$	$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$	ρV_s^2
Módulo de Young (E)	$\frac{\sigma \text{ Longitudinal}}{\epsilon \text{ Longitudinal}}$	$E = 2G(1 + \nu)$	$2 V_s^2 \rho (1 + \nu)$
Módulo de Bulk (K)	$\frac{P \text{ hidrostática}}{\epsilon \text{ volumétrica}}$	$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	$V_p^2 \cdot \rho - \frac{4 \cdot V_s^2 \cdot \rho}{3}$

Nota. La medición precisa de las velocidades sísmicas (V_p y V_s) ha sido uno de los temas más importantes en la historia de la geofísica teórica y de exploración, la unidad del sistema internacional de los módulos G, E: Pa; 1Pa = 1N/m².

2.2.4 Prospección eléctrica

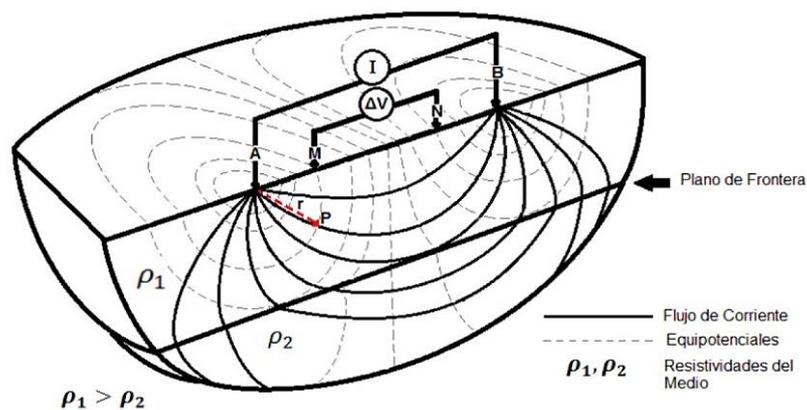
La prospección eléctrica fundamenta su investigación en un campo eléctrico proyectado en el subsuelo mediante la inyección de corriente eléctrica al terreno por medio de un generador de corriente.

El flujo de corriente de la figura 17, pasará por el electrodo A con una intensidad I_A en el subsuelo transmitiendo por el medio y saldrá por el electrodo B con una intensidad I_B , cerrando la fase con su regreso al generador, dando como resultado:

$$I_A + I_B = 0$$

Si el campo de investigación es inmóvil, se cumple el principio del arreglo tetraelectrónico para el método de tomografía de resistividad eléctrica, donde se muestra la inyección de corriente I en los electrodos AB y la recepción del potencial ΔV en los electrodos MN.

Figura 17.
Arreglo tetraelectrónico para TRE



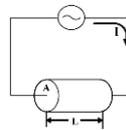
Nota. Arreglo tetraelectrónico. Tomado de (Knodel, 2007).

2.2.4.1 Resistividad

Es el comportamiento de la resistencia de un material, entonces, dado el volumen de un material, su resistencia al paso de corriente será proporcional a una cantidad llamada resistividad eléctrica que se sujeta de la composición de la muestra y a su longitud.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Figura 18.
Comportamiento de la resistencia de un material



Donde

R: Resistencia del material (Ω); *ρ* : Resistividad eléctrica del material en el cilindro (Ωm); *A*: Sección transversal del cilindro (m^2); *L*: Longitud de un cilindro sólido (*m*).

También puede definirse otra cantidad que exprese la facilidad de transmisión de corriente como la inversa de la resistividad, esta magnitud se denomina conductividad eléctrica (Siemens sobre metro (S/m):

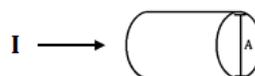
$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{(R) (A)}$$

2.2.4.2 Ley de ohm

Establece que el producto de la corriente eléctrica (*I*) a través de un conductor y la resistencia del conductor (*R*) por la cual pasa la corriente, es equivalente a la diferencia de potencial (*V*) a través del conductor.

$$V = I \cdot R$$

Figura 19.
Corriente eléctrica a través de un conductor





2.2.4.3 Conductividad eléctrica

Es la inversa de la resistividad, se distingue en dos diferencias de conductividad, la metálica o electrolítica, figurado en todos los materiales metálicos que tienen la capacidad de transportar electrones, mientras que la celda electrolítica representa a minerales y rocas aislantes como la (areniscas), conduciendo la electricidad a través del agua que se impregna y llenan sus poros. Importante destacar que también depende del factor de porosidad, proporción en que los poros están llenos de agua o factor de saturación; resistividad del agua que contiene, dependiente a su vez de las sales disueltas.

2.2.4.4 Resistividad aparente

La resistividad aparente (ρ_a) es una variable experimental con que expresan los datos de campo de la mayoría de métodos geoelectrónicos y su resultado en la unidad (Ohm*m). Al valor de resistividad medido del subsuelo se le denomina resistividad aparente que se define como la resistividad de un terreno imaginario homogéneo que es equivalente al terreno real heterogéneo (Perdomo, 2009).

El subsuelo se comporta de manera muy compleja, debido a que existen heterogeneidades en el medio, para cualquier dispositivo, si se conocen las distancias entre los electrodos, se mide la intensidad de corriente (I) que pasa por los electrodos A y B y también se mide la diferencia de potencia en los electrodos M y N, con esto se puede calcular la (ρ_a) con la ecuación general (Iakubovskii y Liajov, 1980).

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

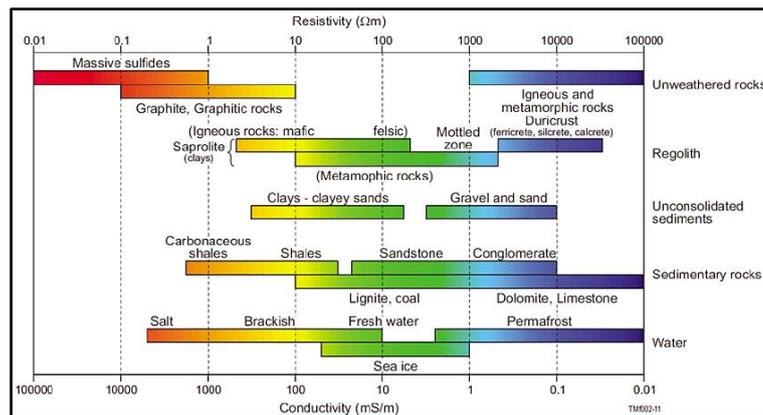
Donde

ρ_a : Resistividad aparente del subsuelo (Ohm-m); K: Constante del dispositivo eléctrico (factor geométrico) (m); ΔV : Diferencia de Voltaje medido (V); I: Intensidad de corriente medida (A)

2.2.5 Resistividad de rocas y minerales

La resistividad es una magnitud física con mayor amplitud de variación para diversos materiales, los factores que determinan la resistividad eléctrica de una roca son: el grado de saturación, temperatura, salinidad del fluido, porosidad y la forma de poros, conductividad de los minerales, la presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico. La cantidad de sales en los suelos depende de la naturaleza de las rocas con las que haya entrado en contacto en su paso por la superficie del terreno o subterránea. La figura 20, muestra los márgenes de variación en algunas rocas y minerales según el rango de resistividades que le caracterizan.

Figura 20.
Rango de valores de resistividad para rocas y suelos



Nota. Resistividad de rocas y suelos. Tomado de (Palacky, 1987)

Tabla 6.
Resistividad de rocas sedimentarias

Material	Intervalo de resistividad ohm.m
Aluvial	10 a 800
Arenas	60 a 1000
Arcilla	1 a 100
Aguas subterráneas	10 a 100
Arenisca	8 – 4x10 ³
Esquistos	20 – 2x10 ³
Caliza	50 – 4x10 ³
Granito	5x10 ³ a 10 ⁶

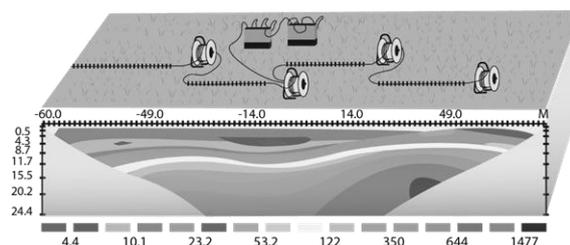
Nota. Intervalo de resistividades. Tomado de (Keller and Frischknecht, 1996).

2.2.6 Tomografía de Resistividad Eléctrica

El estudio de Electrical Resistivity Tomography (ERT) (2D) (Dahlin, 2001), es un método que a partir de los perfiles de tomografía eléctrica muestran las variaciones del parámetro físico de la resistividad eléctrica de los materiales del subsuelo al paso de la corriente eléctrica, aportando una imagen en profundidad de las capas que presentan diferente comportamiento eléctrico, poniendo en evidencia el contenido de agua, sales disueltas en las fracturas de las rocas o en la porosidad del subsuelo, su alcance es considerable y detalla los cambios laterales que presenten los estratos. Los perfiles de tomografía permiten obtener la conductividad eléctrica de las rocas y suelos para conocer su grado de saturación, obteniendo perfiles 2D y visualizar la resistividad del terreno, estos perfiles se correlacionan con información geológica o geofísica de la zona aportando información detallada del subsuelo.

El método consiste en la inyección de una corriente eléctrica continua en la superficie del terreno a través de electrodos plantados en línea continua y mediante un dispositivo receptor se observa la respuesta del subsuelo, siendo el resultado datos de resistividades aparentes. El método sigue los procedimientos de adquisición recomendados en la norma ASTM D6431. Actualmente, existen diferentes configuraciones electrónicas para la toma de datos en campo y en el presente estudio opta por el dispositivo Polo-Dipolo

Figura 21.
Modelo de adquisición por el método TRE



Nota. Modelo del método TRE. Tomado de (Geofísica Argentina, 2015).

2.2.6.1 Dispositivos electródicos

Se conoce como dispositivo electródicos al conjunto de electrodos que inyectan corriente al subsuelo y registran la diferencia de potencial generado en el mismo (Rodríguez, 2005). Los dispositivos usados se diferencian por la distancia relativa y la posición de los electrodos de corriente respecto a los de potencial (Loke, et al. 2002).

Tabla 7.
Factor geométrico de los tipos de arreglos electródicos

Dispositivo Eléctrico	Factor Geométrico (k)
Polo – polo	$2\pi a$
Polo – dipolo	$2\pi n(n + 1)a$
Dipolo – dipolo	$\pi(n)(n + 1)(n + 2)a$
Schlumberger	$\pi(n)(n + 1)a$
Wenner Alfa	$2\pi a$
Wener Beta	$6\pi a$
Wenner Gamma (Enfocado)	$2\pi a$

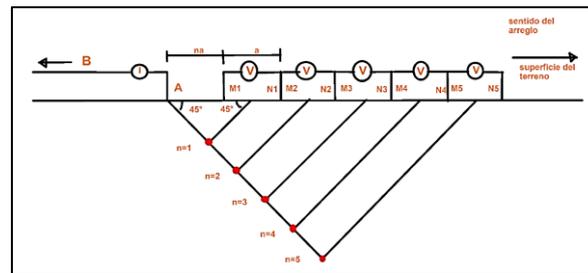
Nota. Factor geométrico de dispositivos eléctricos. Tomado de (Ramírez, 2010)

Dispositivo Polo – dipolo: Consiste en la plantación de un electrodo de corriente A y dos electrodos de potencial formando dipolos a muchas separaciones de la distancia bipolar MN, la corriente es inyectada a través del electrodo de corriente cerrando así el circuito con otro electrodo B que se coloca a una distancia muy grande (teóricamente al infinito), de manera que no influya sobre los dipolos de medición en los que la señal eléctrica es recibida y se efectúa la medición de la respuesta del terreno.

2.2.6.2 Pseudo sección de resistividad aparente

De los datos obtenidos en campo mediante la configuración geométrica, se obtuvo la variación lateral y vertical de la resistividad, y esa representación gráfica de las variaciones denominamos pseudo sección de resistividad (figura 22). Cada valor de la resistividad aparente está representado por un punto en el diagrama donde la posición en dirección horizontal es el punto medio de los electrodos y está relacionado con el nivel (n).

Figura 22.
Gráfica de pseudosección aparente, arreglo Polo – dipolo



2.2.6.3 Profundidad de investigación

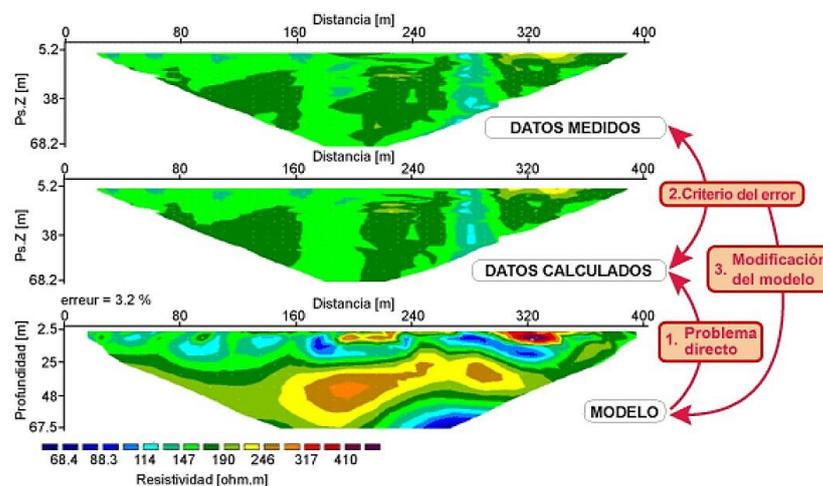
La capacidad de profundización de la tomografía eléctrica depende de la configuración geométrica de los electrodos. En líneas generales, si la distancia de los electrodos aumenta, la profundidad de investigación será mayor.

2.2.6.4 Inversión de Pseudo secciones

El desarrollo para adquirir resistividades reales del subsuelo se realiza por medio del proceso de inversión de datos, por lo general se hace uso de los paquetes de softwares Res2Dinv, Res3Dinv, el proceso parte de los valores de resistividades aparentes medidos y representados como un pseudo perfil, posteriormente se genera un modelo hipotético de resistividades verdaderas del subsuelo, y solucionando el (cálculo del problema directo o modelización directa) se llega al modelo de resistividades aparentes.

Las resistividades aparentes son contrastadas con las realmente medidas y se calcula el error, teniendo como base este error se hace una vez más el cálculo del modelo hipotético de resistividades verdaderas y repetimos el proceso, tras varias interacciones conseguimos un modelo de resistividades verdaderas que de explicación a las aparentes medidas (Molina, 2004). A continuación, la figura 23, expone la estructura general del software Res2Dinv, el primer perfil muestra las resistividades aparentes medidas en campo, el segundo perfil las resistividades aparentes calculadas y el ultimo representa una estimación del modelo real de resistividades.

Figura 23.
Proceso de inversión de datos geoelectricos



Nota. Inversión de datos geoelectricos. Tomado de (Molina, 2004).

2.3 Marco normativo

2.3.1 Peligro sísmico

El Mapa de peligro sísmico global de sus siglas GSHAP (*Global Seismic Hazard Map*) describe el peligro sísmico como la aceleración máxima del suelo (PGA) que representa el 10% de probabilidad de que un terremoto exceda una determinada aceleración en un intervalo de 50 años, correspondiente a un período de retorno de 475 años.

2.3.2 Zonificación sísmica

La zonificación según la norma peruana E.030 está basada en la distribución espacial y temporal de la sismicidad, la atenuación del movimiento sísmico en la corteza y la transformación que sufren las aceleraciones en los estratos del suelo. El territorio peruano se divide en 4 zonas sísmicas (figura 24), asignado con un factor de zona Z que corresponde a la aceleración esperada en suelo bueno, según el listado de zonas nuestra área de investigación la localidad de Amata pertenece a la zona 3 ubicado en el distrito de Coalaque, provincia General de Sanchez Cerro, Región Moquegua. Con factor de zona 0,35 g (aceleración de la gravedad) calificando a zonas de alta sismicidad.

Figura 24.
Mapa de zonificación sísmica de Perú



Nota. Zonificación Sísmica. Tomado de “Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente””, por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (Perú), 2018.

La norma americana IBC, como sucesor del UBC-97 utiliza mapas de isoaceleraciones espectrales para la zonificación sísmica mediante criterios de diseño específico de sitio, S_S y S_1 ; F_a y F_v . El código internacional de construcción está adoptado en 50 estados, motivo de la importancia de su uso. Para los requisitos de diseño sísmico ASCE 7-10 proporciona esa columna vertebral para IBC.

2.3.3 Parámetros sísmicos

Norma Peruana E.030 2018: Según el Artículo 13 de la norma se considera el tipo de perfil que mejor describa las condiciones locales, usando los valores del factor.

2.3.3.1 Amplificación del suelo (S)

Tabla 8.
Factor de amplificación de suelo

Factor de Suelo S				
Zona - Suelo	S_0	S_1	S_2	S_3
Z_4	0.80	1.00	1.05	1.10
Z_3	0.80	1.00	1.15	1.20
Z_2	0.80	1.00	1.20	1.40
Z_1	0.80	1.00	1.60	2.00

Nota. Tomado de “Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente””, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (Perú), 2018.

2.3.3.2 Periodos T_P y T_L

Tabla 9.
Periodos de vibración de suelo

Periodos T_P , T_L				
Perfil de suelo				
	S_0	S_1	S_2	S_3
T_P (seg)	0.30	0.40	0.60	1.00
T_L (seg)	3.00	2.50	2.00	1.60

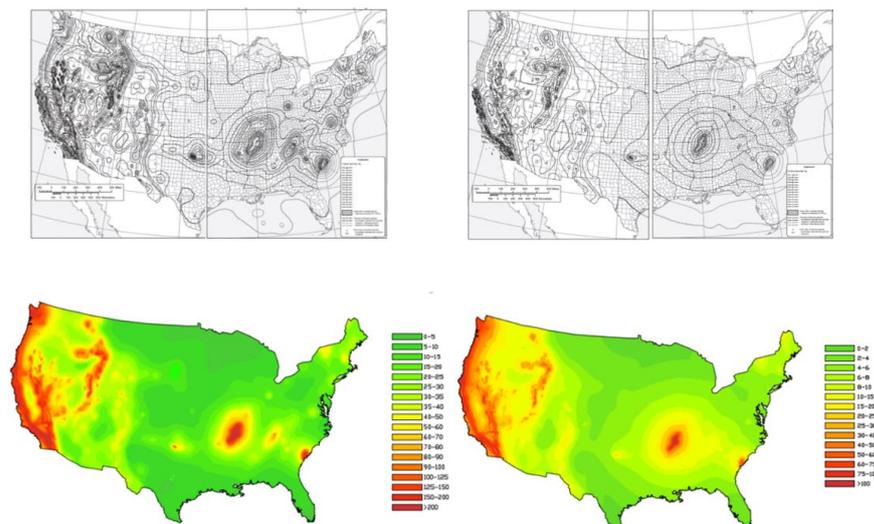
Nota. Tomado de “Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente””, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (Perú), 2018.

Donde

T_P : Periodo corto que define la plataforma del factor C; T_L : Periodo largo que define el inicio de la zona del factor C con desplazamiento constante.

Norma americana IBC-ASCE 7: Para obtener los parámetros S_S y S_1 (figura 25) siendo respectivamente las aceleraciones espectrales de osciladores usado en suelo firme, correspondientes a periodos de 0.2 segundos (estructura de periodo corto) y 1.0 segundos (estructura de periodo largo), para un tipo de suelo x, considerando el 5% de amortiguamiento para un periodo de retorno de 475 años.

Figura 25.
Mapa de valores espectrales USA



Nota. Valores espectrales, izquierda Corto plazo (S_S), derecha, largo plazo (S_1) Tomado de “Internacional Building Code” (IBC 2018/ ASCE 7-16).

Representación de mapas USA, análisis sísmico basado en las isoaceleraciones espectrales para sismo máximo considerado cada 2500 años, sismo excepcional (2% en 50 años).

2.3.3.3 Coeficiente de Sitio para periodos cortos

Tabla 10.
Coeficiente de sitio para periodos cortos

Coeficiente de Sitio para periodos cortos, Fa							
Tipo de Suelo	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.50$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.00$	$S_S = 1.25$	$S_S \geq 1.5$	
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0	
E	2.4	1.7	1.3	Note b	Note b	Note b	
F	Note b	Note b	Note b	Note b	Note b	Note b	

a: utilizar la interpolación en línea recta para los valores medidos de la aceleración de la respuesta espectral mapeado a corto plazo S_S .

b: los valores se determinarán de conformidad con la sección 11.4.8 del ASCE 7.

Nota. Coeficiente de sitio. Tomado de “Código internacional IBC”, International Building Code (USA), 2018.

2.3.3.4 Coeficiente de Sitio para periodos largos

Tabla 11.
Coeficiente de sitio para periodos largos

Coeficiente de Sitio para periodos largos, Fv							
Tipo de Suelo	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$	$S_1 \geq 0.6$	
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	
B	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4	
D	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7	
E	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0	
F	Note b	Note b	Note b	Note b	Note b	Note b	

a: utilizar la interpolación en línea recta para los valores medidos de la aceleración de la respuesta espectral mapeada en un periodo de 1 seg, S_1

b: los valores se determinarán de conformidad con la sección 11.4.8 del ASCE 7.

Nota. Coeficiente de sitio. Tomado de “Código internacional IBC”, International Building Code (USA), 2018.

2.3.4 Perfil de suelo

Norma Peruana E.030 2018: El Artículo 12 numeral 12.1. Los perfiles de suelo se clasifican en cinco perfiles (S_0 , S_1 , S_2 , S_3 y S_4), solo el caso excepcional para el perfil S_4 , corresponde a suelos flexibles, es decir donde las condiciones geológicas, topográficas son particularmente desfavorables de tal modo que requiere efectuar un estudio de mecánica de suelos que ayude a determinar el perfil de suelo.

Tabla 12.
Clasificación de los perfiles de suelo

Clasificación de los perfiles de suelo				
Perfil	\bar{V}_s	\bar{N}_{60}	\bar{S}_u	Descripción
S_0	> 1500 m/s	-	-	Roca dura
S_1	500 – 1500 m/s	> 50	> 100 kPa	Roca o suelos muy rígidos
S_2	180 – 500 m/s	15 – 50	50 – 100 kPa	Suelos intermedios medianamente rígidos
S_3	< 180 m/s	< 15	25 – 50 kPa	Suelos blandos
S_4	Clasificación basada en el EMS		Condiciones excepcionales	

Nota. Perfil de suelo. Tomado de “Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente””, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (Perú), 2018.

Norma americana IBC - ASCE 7: Clasifica los suelos en 6 tipos, (A, B, C, D, E, F), considerando el efecto del suelo mediante factores como la zona de aceleraciones de periodos cortos y la zona de velocidades de periodos largos.

Tabla 13.
Clasificación de tipo de suelo

Clasificación de suelo				
Tipo de suelo	\bar{V}_s	\bar{N} o \bar{N}_{ch}	\bar{S}_u	Descripción
A	> 1500 m/s	-	-	Roca dura
B	760 – 1500 m/s	-	-	Roca
C	360 – 760 m/s	> 50	> 100 kN/m ²	Suelo muy denso y/o roca suave
D	180 – 360 m/s	15 – 50	50 – 100 kN/m ²	Suelo rígido
E	< 180 m/s	< 15	< 50 kN/m ²	Suelo arcilloso rígido
F	Suelos que requieren análisis de respuesta del sitio			

Nota. Tipo de Suelo. Tomado de “Normativa de la sociedad estadounidense de ingenieros civiles” (ASCE/SEI 7-16, 2017).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Metodología de investigación

3.1.1 Tipo y método de investigación

Según Borja (2016). La investigación se puede clasificar de acuerdo al fin que se busca: Investigación básica, investigación aplicada e investigación tecnológica. De acuerdo a la metodología para demostrar la hipótesis: Investigación no experimental e investigación experimental. Siendo la presente investigación de tipo aplicada no experimental.

Según Borja (2016). La investigación se puede clasificar de acuerdo a los datos analizados: Investigación cuantitativa y cualitativa. Señala también, la investigación descriptiva como un tipo de investigación no experimental. De modo que la presente investigación tiene un enfoque cuantitativo con alcance descriptivo, pues se parte de la recolección de datos y análisis de variables, posteriormente se describen los datos y características de la población o fenómeno de estudio, que refiere a las propiedades físicas y dinámicas del subsuelo que compone el área de EVAR.

3.1.2 Población de estudio

Desde el punto de vista estadístico se denomina población o universo al conjunto de elementos o sujetos que serán motivo de estudio (Borja, 2012). Es así como nuestra población de estudio consta de los materiales del subsuelo que componen el área señalada como EVAR, Nuevo Amata, el que cuenta con una extensión de 92 149.09 m².



3.1.3 Muestra y diseño muestral

El tamaño de la muestra a veces se limita por el costo que involucra, o por el tiempo disponible indica (Borja, 2012). Las investigaciones geotécnicas para edificaciones requieren del reconocimiento de los 30 metros más superficiales del terreno desde la base de cimentación, adquiriendo mediante métodos no invasivos las muestras con los registros sísmicos y eléctricos.

Motivo por el cual se trabajará con un muestreo intencional y/o no probabilístico, que a juicio del investigador son aptos para el desarrollo de los ensayos: El que consiste en el diseño y planteamiento de líneas y puntos prospectivos sobre zonas susceptibles e importantes del área de EVAR, considerando su aspecto geomorfológico y geodinámico.

3.2 Etapas de la investigación

3.2.1 Etapa 1: Revisión de base bibliográfica

La presente investigación inició con la revisión cartográfica de la zona, el cuadrángulo perteneciente, imágenes de satélite del área de interés, información disponible del portal GEOCATMIN, artículos publicados por INGEMMET, Normativas de diseño sismorresistente E.030, IBC/ASCE 7. Con la información bibliográfica obtenida se permitió efectuar la investigación de tesis planteada por etapas y fases de trabajo.

3.2.2 Etapa 2: Área de estudio

En esta etapa se realizó la compilación de la información adquirida en la primera etapa, mediante la generación de mapas temáticos (ubicación, geomorfología, geología, hidrogeología) que delimitan la localidad de Amata. Toda esta información será imprescindible para las siguientes etapas de investigación.



3.2.3 Etapa 3: Trabajo de campo

Fase 1. Disposición de las líneas y puntos de prospección. En esta primera fase se realiza la instalación de los equipos abarcando el área suficiente que permita la extensión de las líneas de adquisición con los métodos planteados.

Fase 2. Adquisición de datos. En esta segunda fase, se adquiere la data en campo con los registros sísmicos y eléctricos.

3.2.4 Etapa 4: Trabajo de gabinete

Fase 3. Procesamiento e inversión de datos. Se realiza el procesamiento de la data adquirida en campo previo análisis de los mismos a fin de ejecutar el correcto proceso de inversión y obtención de perfiles de ondas sísmicas, perfiles de resistividades, todo esto haciendo uso de softwares independientes a los métodos geofísicos aplicados.

Seislmager: Software que permite el procesamiento de la data sísmica obtenida por el método Sísmica de Refracción, Análisis Multicanal de Ondas Superficiales.

Res2Dinv: Software que permitió el procesamiento de datos de resistividades adquiridos mediante el método Tomografía de Resistividad Eléctrica.

Fase 4. Análisis e integración de resultados. Esta última fase comprende del análisis de los resultados a fin de aplicar métodos estadísticos sobre el análisis experimental con el fin de establecer propiedades dinámicas de los materiales del subsuelo de EVAR calculando a su vez el error relativo de las muestras.

3.3 Instrumentos

3.3.1 Equipo sísmico

3.3.1.1 Sismógrafo Geode

Equipo para la obtención de registros sísmicos del modelo Geode de GEOMETRICS de origen Americano, se opera desde una computadora portátil con Windows 10/11 registrando los pulsos de corriente inducida por vibración procedente de cada receptor sísmico en forma digital.

Figura 26.
Equipo sísmico



3.3.1.2 Accesorios

- **Cable Sísmico.** El cable de 24 m salidas a intervalos de 5m realiza la conexión al conector del geófono y directamente al Geode para ser digitalizada la información. La regla general del tendido es que sea 3 veces a la profundidad de investigación, siendo así el uso de un cable conector de 120m.
- **Geófonos:** El dispositivo es un sensor sísmico, sensible a las vibraciones y genera un pulso eléctrico proporcional a la intensidad de la vibración. Se hace uso de 24 geófonos verticales de frecuencia baja (4.5 – 14Hz).
- **Fuente sísmica:** La fuente proviene de una comba de 24lb, apropiada para un tendido sísmico de 100m basado en pruebas de ensayo para adquisición.
- **Fuente de energía:** Batería de alta densidad y rendimiento con voltaje de entrada de corriente continua de 12V.

3.3.2 Equipo Eléctrico

3.3.2.1 Resistivímetro SYSCAL Pro

Equipo empleado para la obtención de los registros eléctricos del modelo SYSCAL Pro de Iris Instrument (Orleans, Francia). Tiene un medidor de resistividad de 10 canales que permite obtener simultáneamente un conjunto de 10 mediciones y realiza la conmutación automática de los electrodos.

Figura 27.
Equipo eléctrico



3.3.2.2 Accesorios

- **Electrodos de corriente:** Son los medios conductores de intensidad de corriente eléctrica y receptores de diferencia de potencial, hechos de acero o cobre, la dimensión de estos es de 30cm de longitud y 1cm de diámetro. Se hace uso de 24 electrodos.
- **Carrete de cable:** 2 cables de potencial multielectrodico de 10 conexiones con espaciamiento de 10m, con una extensión máxima de 100 m. Además de 1 cable de corriente de 200 m y 1 cable de corriente de 300m para la conexión al infinito.
- **Conectores:** Específicamente para la conexión de los electrodos distribuidos a los nodos de los cables por medio de conectores caimán-caimán.
- **Fuente de energía:** Batería de alta densidad y rendimiento con voltaje de entrada de corriente continua de 12V.



- **Herramientas accesorias:** Multímetros, Radios de comunicación, GPS navegador, Libreta de campo, Cinta métrica de 100m, Cinta aislante 3M, Combas, Pelacables y Alicata universal.

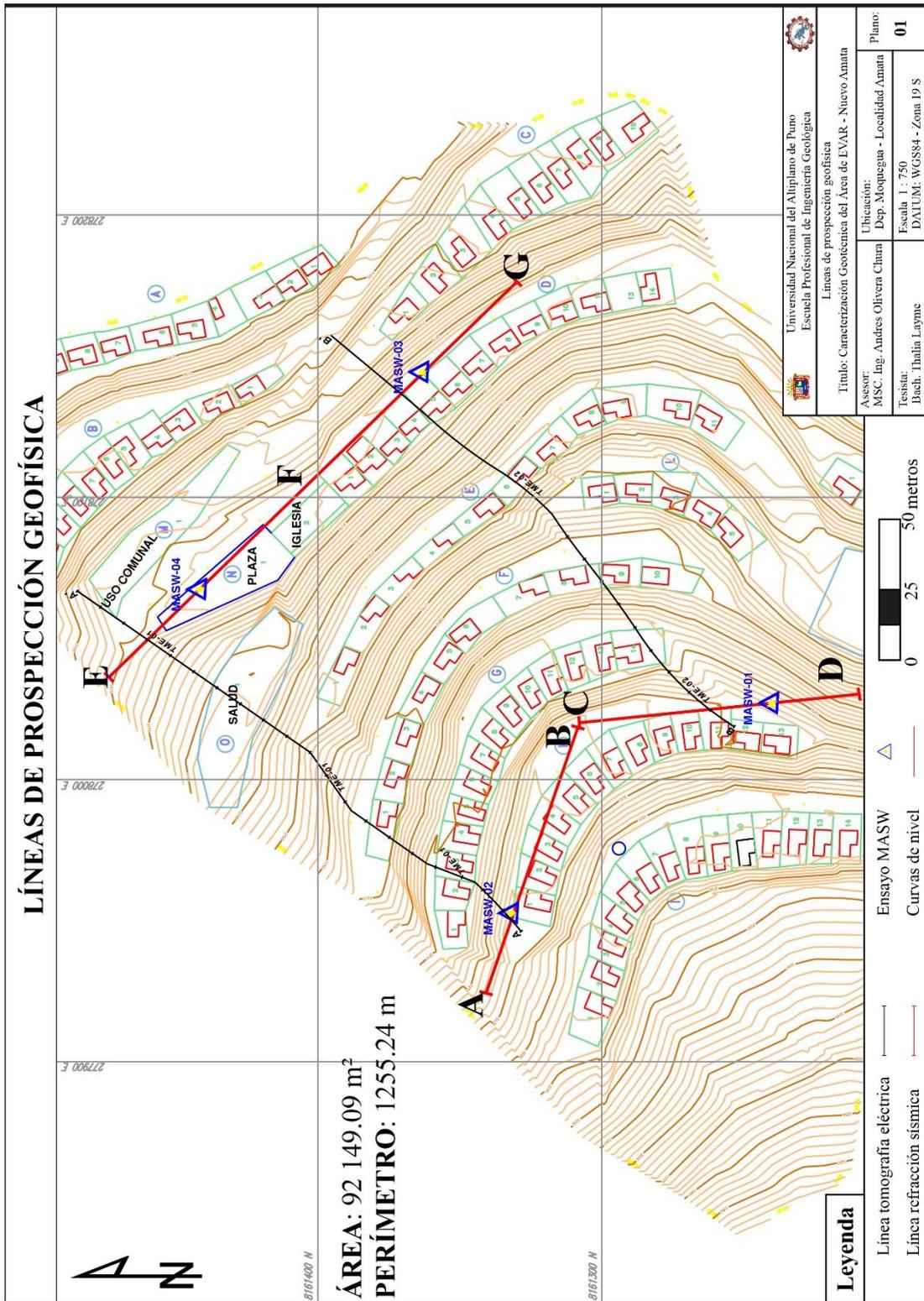
3.4 Trabajo de campo

3.4.1 Disposición de las líneas de prospección

El alcance de los objetivos planteados en la investigación inicia con la disposición de las líneas previo reconocimiento del campo de trabajo, mediante la información recopilada se plantea en gabinete la ubicación de los equipos y su instalación para ser distribuidos considerando la topografía del área urbana, la geomorfología y la geología local de Nuevo Amata.

Se ha realizado el diseño de las líneas de prospección en función a la profundidad de exploración como se observa en la figura 28, para ello se define el eje de las líneas de refracción sísmica en tres secciones (LS01, LS02, LS03) dos de 100 metros y una de 200 metros en los niveles extremos del área. Mientras la ubicación de los puntos MASW 01, 02, 03, 04 se distribuyen en las líneas sísmicas, dos primeros puntos en las líneas LS01 y LS02, los puntos restantes en la línea LS03. En cuanto a las líneas de tomografía eléctrica se dividen en dos secciones TRE 01, TRE 02 de 200 metros de longitud cada una, con la distribución de los electrodos a cada 10 m. La disposición de las líneas tomográficas es realizada en dirección perpendicular a las líneas sísmicas, esta distribución abarca el área de interés a fin de caracterizar la velocidad de propagación de ondas sísmicas emplazadas a profundidad, la distribución de la resistividad en los materiales y posibles anomalías ligadas a grietas, discontinuidades del subsuelo. Cada línea geofísica fue referenciada en campo mediante la obtención de sus coordenadas en el Datum WGS84, con la proyección UTM y ubicación en la zona 19 Sur.

Figura 28.
Disposición de líneas de prospección



Nota. Líneas de prospección geofísica en área de estudio Nuevo Amata. Elaboración propia.

3.4.2 Adquisición de datos

Método Sísmica de Refracción: Una vez dispuesto el equipo sísmico en el terreno, se procede a configurar sismógrafo desde el ordenador portátil para el registro de la información, es imprescindible descartar agentes externos que generen ruido ambiental al momento de la recolección de datos. Se utilizó con una fuente activa con arreglo lineal de geófonos, donde se realizan los disparos (shot) lejanos e intermedios a la línea. La tabla 14, resume los parámetros de adquisición utilizados para el método.

Figura 29.
Disposición en campo, línea sísmica LS – 01



Nota. La figura muestra la conexión estable de los geófonos al cable de refracción sísmica para la toma de registros sísmicos correspondiente a la línea sísmica LS – 01.

Tabla 14.
Parámetros de adquisición de ondas P

Parámetro	Descripción
Configuración del arreglo	Arreglo lineal
Longitud del arreglo	120 m de longitud de tendido total.
Intervalo de geófono	5 m, según la longitud del arreglo.
Número de geófonos	24 geófonos verticales de frecuencia baja (4.5 Hz).
Equipo fuente	Martillo (24 lb) (10.8 kg).
Trigger	Interruptor de martillo encintado al cabo del martillo y conectado al puerto de disparo del sismógrafo.
Intervalo de muestreo	0.125 – 0.5 milisegundos (ms)
Longitud de registro	0.250 – 1 segundos.
Stacking	3 – 5 Per shot

Nota. Parámetros usados en campo. Tomado del manual equipo Geode.

Método Análisis Multicanal de Ondas Superficiales: Por ser una metodología activa es imprescindible descartar agentes externos que provoquen ruido ambiental al momento de la recolección de datos ya que los sensores captan movimientos mínimos que pueden resultar perjudiciales en el registro. Se utiliza una fuente activa con un arreglo lineal de geófonos, donde se realizan los disparos (shot) fuera de la línea (10% y 20%) a ambos lados. La tabla 15, detalla los parámetros de adquisición utilizados para el método (MASW).

Figura 30.
Adquisición de datos en campo, MASW – 01



Nota. La figura muestra el registro de datos perteneciente al ensayo MASW 01.

Tabla 15.
Parámetros de adquisición de ondas S

Parámetro	Descripción
Configuración del arreglo	Arreglo lineal
Longitud del arreglo	120 m de longitud de tendido necesario.
Intervalo de geófono	5 m, de longitud del arreglo.
Número de geófonos	24 geófonos verticales de frecuencia baja (4.5 Hz).
Equipo fuente	Martillo (24 lb) (10.8 kg).
Trigger	Interruptor de martillo.
Intervalo de muestreo	0.5 o 1 milisegundos (ms)
Longitud de registro	1 a 2 segundos.
Stacking	3 – 5 Per shot

Nota. Parámetros usados en campo. Tomado del manual equipo Geode.

Método Tomografía de Resistividad Eléctrica: Una vez dispuestos el equipo en campo se procede a conectar los cables de corriente a los electrodos, así mismo al Resistivímetro que lleva la configuración Polo – Dipolo. Luego se procede con la toma de datos de forma automática y guardándose en la memoria del Syscal. Los parámetros utilizados para el método de tomografía de resistividad eléctrica se detallan en la tabla 16.

Figura 31.
Registro de datos correspondientes a la línea tomográfica TRE – 01



Nota. La figura muestra el registro de datos eléctricos perteneciente a la Línea TRE 01.

Tabla 16.
Parámetros de adquisición eléctrica

Parámetro	Descripción
Configuración de arreglo lineal	Polo – Dipolo
Medición	Resistividad aparente.
Factor geométrico (K)	$2\pi n(n + 1)a$
Espaciamiento entre Electrodo	10m
Quality factor	3 – 6 %
Voltaje mínimo/máximo (Tx)	500/800v
Número de Mediciones por Lectura	2 - 3
Duración del pulso de inyección	2s
Longitud de Línea	200m
Distancia al infinito	100m

Nota. Parámetros usados en campo. Tomado del manual equipo Syscal.

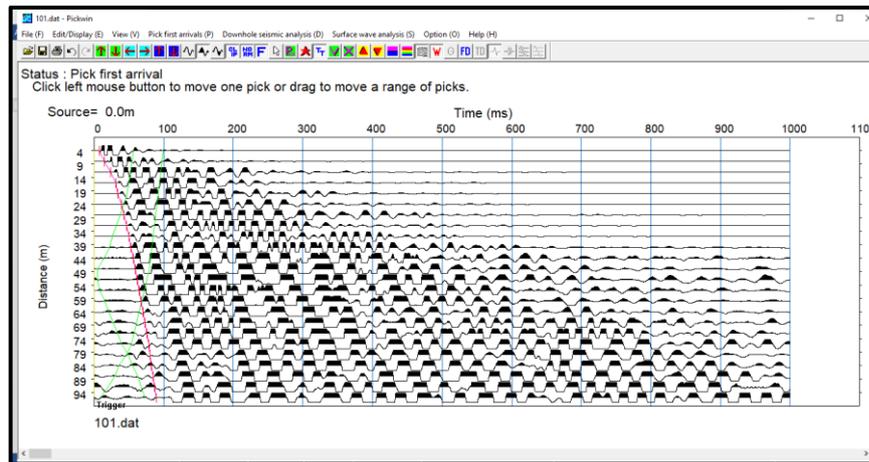
3.5 Trabajo de gabinete

3.5.1 Procesamiento e inversión

Método Sísmica de Refracción: Una vez obtenido los datos en campo por la metodología Sísmica de Refracción, se realiza el procesamiento e inversión de los mismos mediante el software *SeisImager/PickWin* programa de visualización de sismogramas, *Plotrefa (Refraction Analysis)* que produce un modelo de profundidad de capas. El proceso se realizó en el siguiente orden:

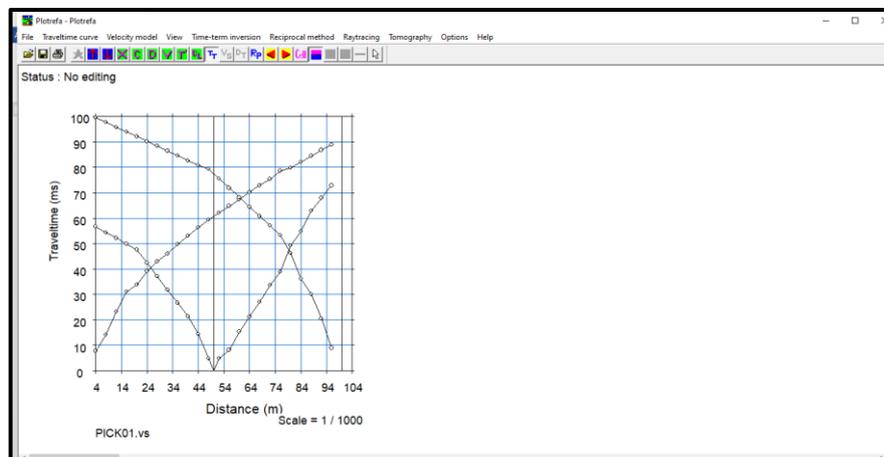
1. Determinación de los tiempos de arribo de las ondas P.

Figura 32.
Tiempo de arribo de ondas P



2. Elaboración del gráfico tiempo – distancia e identificación del número de capas.

Figura 33.
Gráfico tiempo – distancia



3. Obtención del perfil bicapa, modelo de velocidades de capa constante y obtención del modelo de velocidades de ondas P, tanto de sus espesores a partir de la inversión y tomografía.

Figura 34.
Modelo de velocidades de capa constante

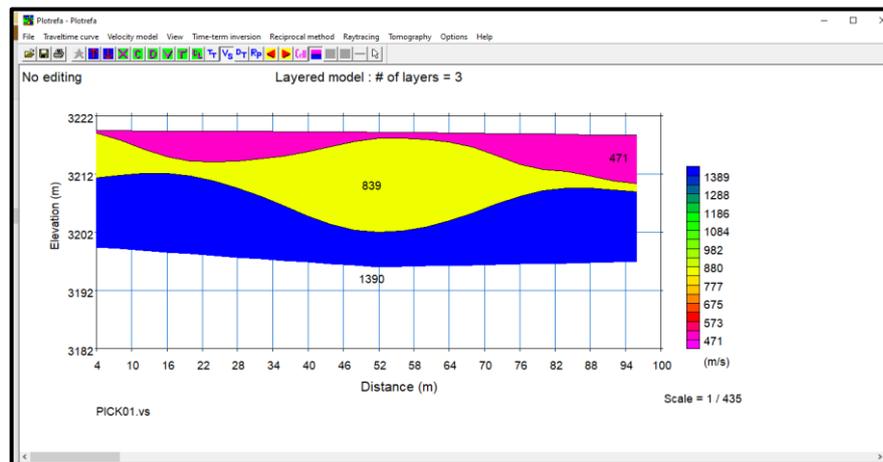
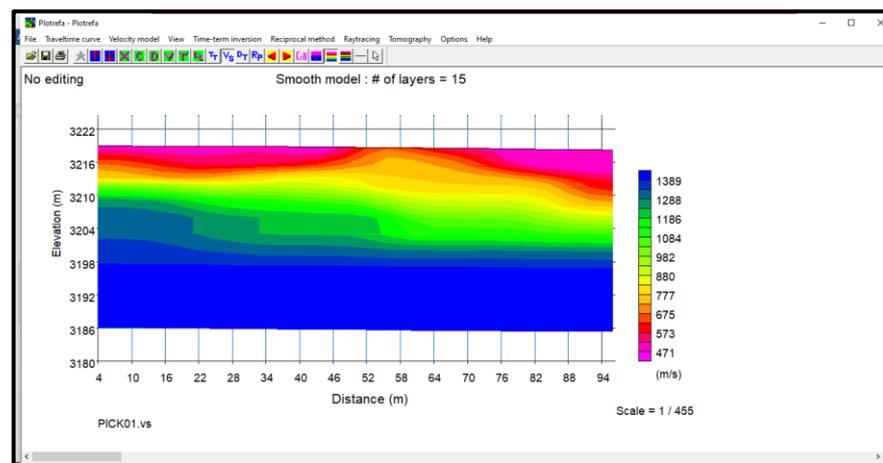


Figura 35.
Modelo de velocidad de ondas P



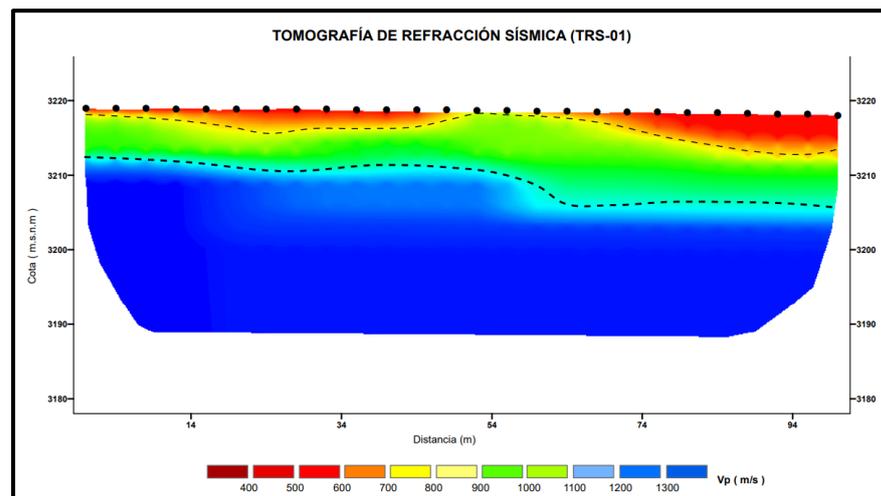
El primer programa *Pickwin* realiza la lectura del registro sísmico (Sismograma), que gráficamente se muestran como un grupo de trazas, a cada punto de percepción le corresponde una traza. Figura 32, las trazas poco agitadas antes del impulso señalan la llegada de ondas directas y refractadas por una perturbación notable; este proceso consiste en determinar el tiempo de arribo de cada señal

Seguido al proceso, se obtienen las gráficas tiempo – distancia, llamadas (Curvas Dromocrónicas), en la figura 33 se determina los cambios de pendiente de los tiempos obtenidos en forma de rectas, del cual se produce por teoría que el inverso de la pendiente de cada recta, representa la velocidad aparente para un determinado estrato.

El segundo programa *Plotefra* realiza el procesamiento mediante la obtención de velocidades y espesores de estratos con técnicas de mínimos cuadrados (figura 34), para luego usar el método de tiempo de retardo y estimar las profundidades, ajusta las profundidades de cada estrato por efecto de la superficie topográfica (figura 35), la inversión busca un modelo de propiedades físicas que satisfaga las observaciones.

Terminado el análisis de datos sísmicos de refracción se procede a la delimitación, interpretación y descripción del perfil obtenido, como referencia se hace el uso de cuadros con valores típicos de velocidad de compresión (Velocidad de la onda de compresión (V_p) según la Norma (ASTM – D 5777).

Figura 36.
Delimitación tomográfica TRS – 01



Nota. Perfil tomográfico perteneciente a la línea sísmica 01. Elaboración propia.

Método Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW): Para el procesamiento de datos por la metodología MASW se utilizó los programas *Seislmager/SW*, programa de análisis de ondas superficiales y *Seislmager/WEq*, programa de inversión de ondas superficiales. El proceso se realiza en el siguiente orden:

1. Visualización del registro sísmico de ondas de superficie y transformada de Fourier (Transformada de Fourier + Pick Phase Velocities (1D), para la obtención del modo fundamental.

Figura 37.
Registro de ondas de superficie

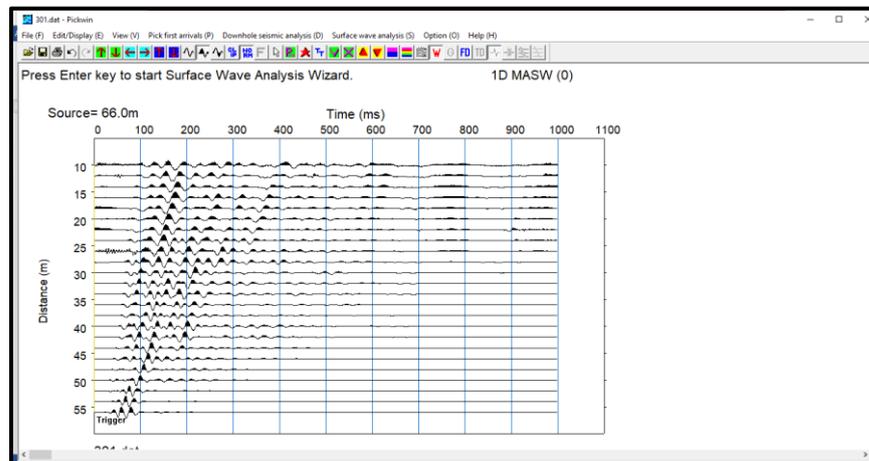
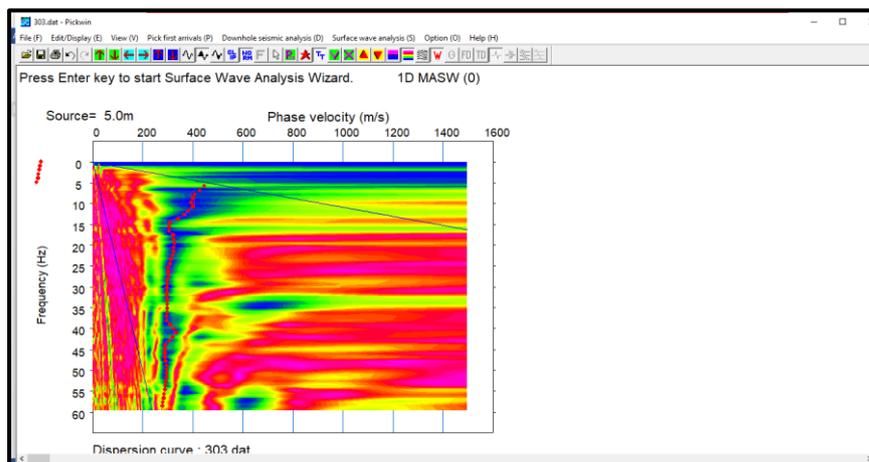


Figura 38.
Perfil Transformada de Fourier



2. Inversión de la curva de dispersión y obtención del modelo unidimensional o perfil 1D.

Figura 39.
Curva de dispersión

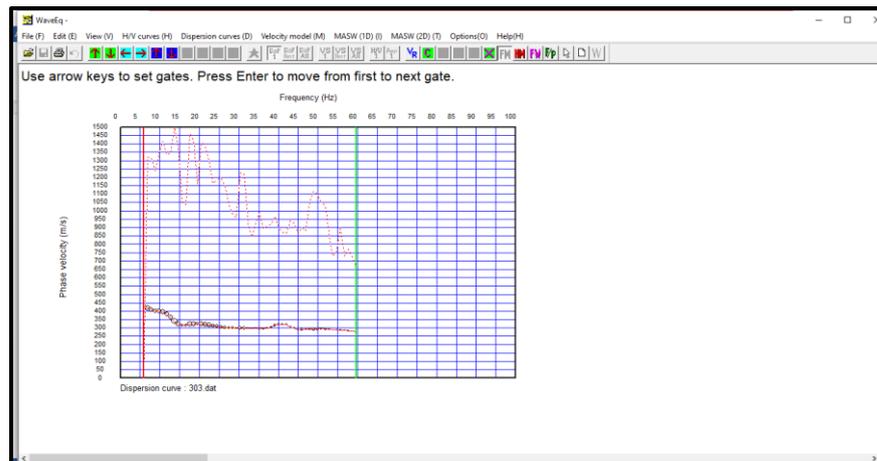
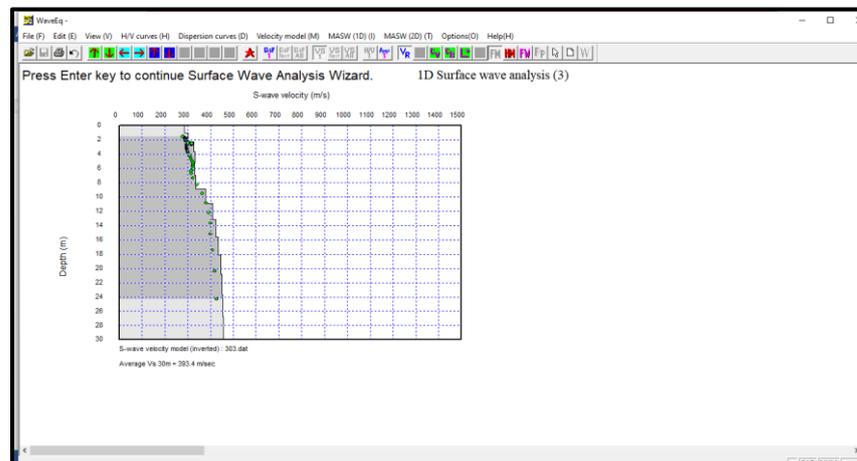


Figura 40.
Perfil de procesamiento 1D

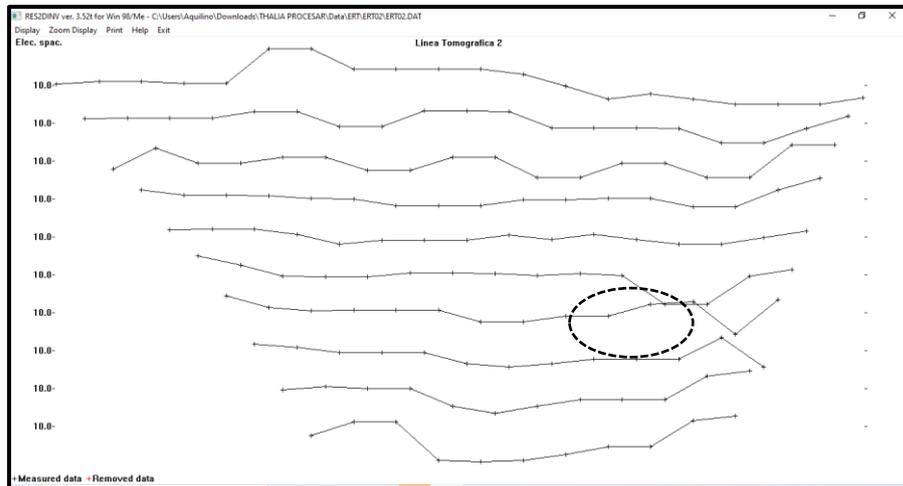


El primer programa *Surface Wave Analysis Wizard SW* muestra el registro sísmico y el gráfico de tiempo versus distancia ($t - d$) (figura 41). El segundo programa **Wave Eq** (*Surface Wave Analysis*), obtiene la variación de la curva de dispersión en un gráfico de *velocidad de fase vs frecuencia* ($c - f$) mediante la transformada de Fourier (figura 38) donde se visualiza la tendencia de la onda de fase que define la (V_s) que permitirá generar la curva de dispersión en el modo fundamental. Seguidamente en la figura (39) se realiza la inversión de datos mediante el método no lineal de mínimos cuadrados (Xia et al., 1999), aplicado a cada curva de dispersión para la reconstrucción del perfil 1D (figura 40) de velocidad de la onda de corte (V_s).

Método Tomografía de Resistividad Eléctrica: El procesamiento de la data eléctrica requiere del programa *Res2Dinv* (*Geotomo Software Inc.*) ya que realiza una inversión de la data cruda para llegar a resultados que asemejan la realidad estudiada. Para ello organizamos la data extraída del equipo Syscal en formato de archivo .dat.. El proceso se realiza en el siguiente orden:

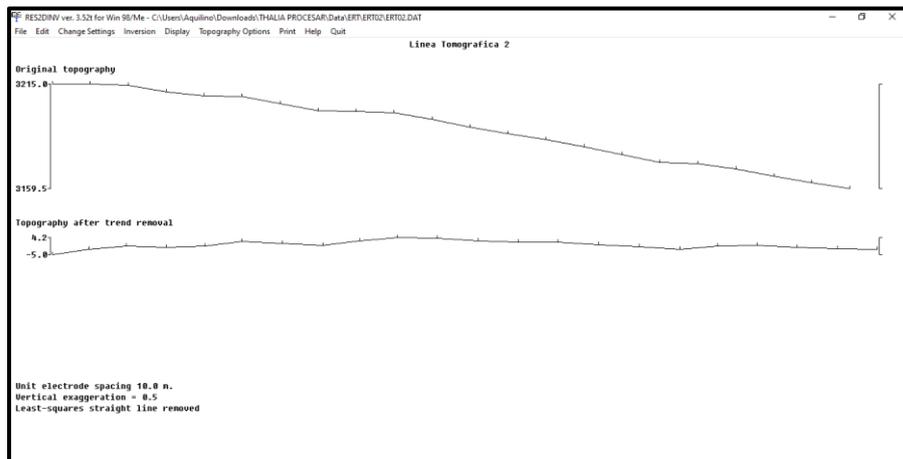
1. Control de calidad de la data previo procesamiento según criterios adecuados: Los datos de resistividad se sometieron a una depuración de ruido o señales parásitas de los datos presentados en un pseudo perfil de resistividad aparente (figura 41).

Figura 41.
Perfil de depuración de datos malos



2. Visualización de la topografía en el perfil.

Figura 42.
Topografía de la sección eléctrica



3. Obtención del modelo más ajustado a partir de la inversión: El resultado de nuestra sección de resistividad ha sido tratado con el programa *Res2Dinv* que usa el problema inverso para obtener el modelo de las resistividades reales del subsuelo y la presentación grafica.

Figura 43.
Sección de resistividades reales

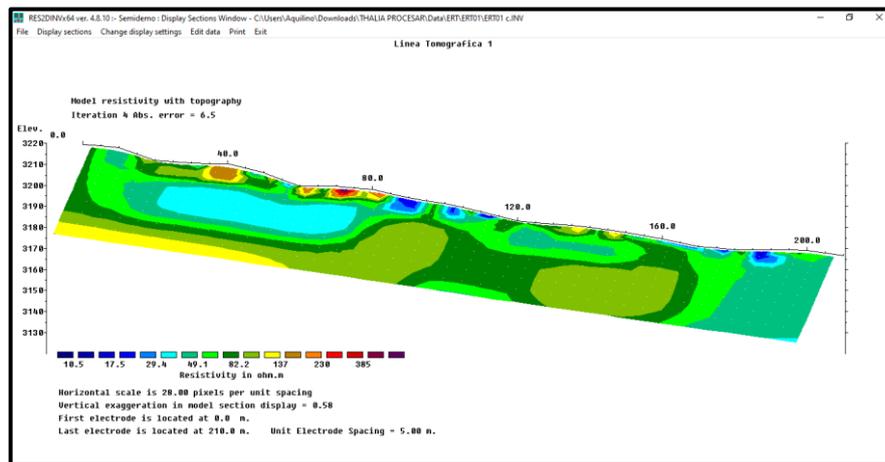
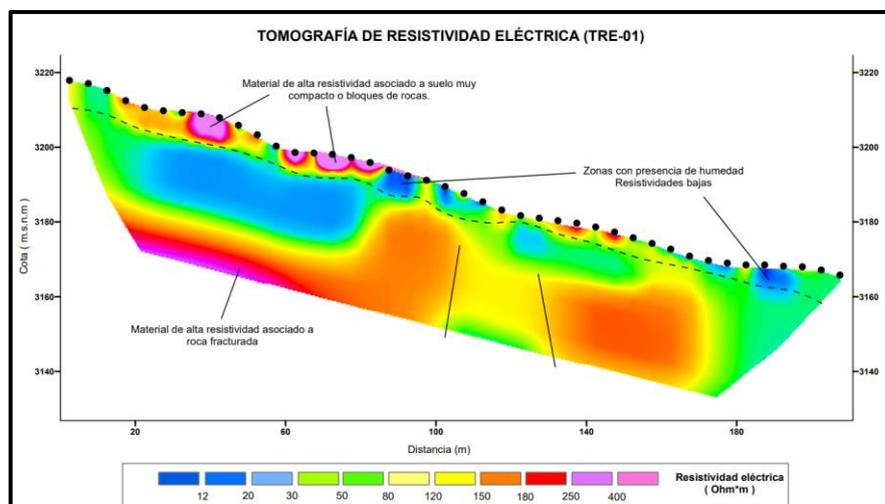


Figura 44.
Perfil de tomografía de resistividad eléctrica



Nota. Perfil tomográfico perteneciente a la línea eléctrica 01. Elaboración propia.

La data reingresada al *RES2Dinv*, realiza el procesamiento mediante una serie interacciones para examinar todas las probabilidades y usar el menor error de respuesta, estas interacciones son basadas en modelos matemáticos que se asemeja al valor real del terreno y se presentan en (*pseudo sección de resistividades aparentes*).

3.5.2 Análisis e integración de datos

3.5.2.1 Datos del Perfil Unidimensional MASW

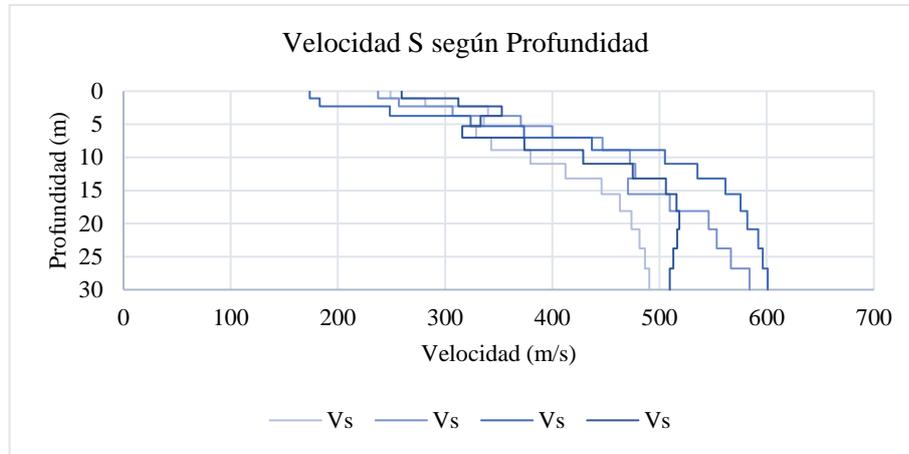
Posteriormente de obtener el modelo unidimensional a partir de la inversión, se recopila una tabla con los datos de velocidad de onda S, para cada shot realizado en el ensayo, llevándolo a un Excel se aplica fórmulas, promedios y otros datos estadísticos con el fin de obtener una interpretación del promedio de velocidad (V_{s30}) y (V_{s10}). Información que se expresa según la tabla 17, resumen de profundidades (D) versus velocidades S (V_s).

Tabla 17.

Valores obtenidos del perfil unidimensional MASW

MASW 01		MASW 02		MASW 03		MASW 04	
V_s (m/s)	D (m)						
249	0	237.5	0	173.75	0	259.5	0
249	1.071	237.5	1.071	173.75	1.071	259.5	1.071
281.5	1.071	257	1.071	183	1.071	312.5	1.071
281.5	2.308	257	2.308	183	2.308	312.5	2.308
340	2.308	307	2.308	248.5	2.308	353	2.308
340	3.709	307	3.709	248.5	3.709	353	3.709
336	3.709	370.5	3.709	323.75	3.709	333	3.709
336	5.275	370.5	5.275	323.75	5.275	333	5.275
329	5.275	400	5.275	373.5	5.275	316	5.275
329	7.005	400	7.005	373.5	7.005	316	7.005
343	7.005	447	7.005	437	7.005	374	7.005
343	8.901	447	8.901	437	8.901	374	8.901
379.5	8.901	472.5	8.901	505	8.901	429	8.901
379.5	10.962	472.5	10.962	505	10.962	429	10.962
412.5	10.962	477.5	10.962	535.5	10.962	475	10.962
412.5	13.187	477.5	13.187	535.5	13.187	475	13.187
446	13.187	470.5	13.187	561.5	13.187	506	13.187
446	15.577	470.5	15.577	561.5	15.577	506	15.577
463	15.577	509.5	15.577	575.5	15.577	516	15.577
463	18.132	509.5	18.132	575.5	18.132	516	18.132
474	18.132	546	18.132	582	18.132	518.5	18.132
474	20.852	546	20.852	582	20.852	518.5	20.852
481.5	20.852	553.5	20.852	592	20.852	516.5	20.852
481.5	23.736	553.5	23.736	592	23.736	516.5	23.736
486.5	23.736	566.5	23.736	596.25	23.736	513	23.736
486.5	26.786	566.5	26.786	596.25	26.786	513	26.786
490.5	26.786	584	26.786	601	26.786	509.5	26.786
490.5	30	584	30	601	30	509.5	30
V_{s10}	295		322		273		311
V_{s30}	401		448		431		431

Figura 45.
Velocidad de propagación (V_s) en los 30m de estudio

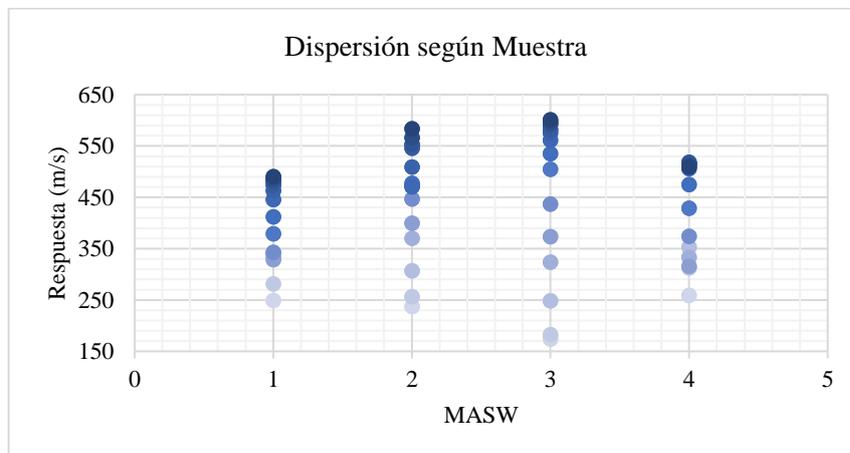


Se realizó el análisis estadístico normal sobre el total de datos obtenidos en cada muestra MASW con los valores de Onda S (m/s).

Tabla 18.
Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S

MASW	Recuento	Promedio	Mediana	Varianza	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Rango
01	28	393,714	396,0	6424,32	80,1519	249,0	490,5	241,5
02	28	442,786	471,5	12417,4	111,433	237,5	584,0	346,5
03	28	449,161	520,25	24477,9	156,454	173,75	601,0	427,25
04	28	423,679	452,0	8704,36	93,2971	259,5	518,5	259,0
Total	112	427,335	455,0	13123,4	114,557	173,75	601,0	427,25

Figura 46.
Dispersión de velocidades según muestras MASW



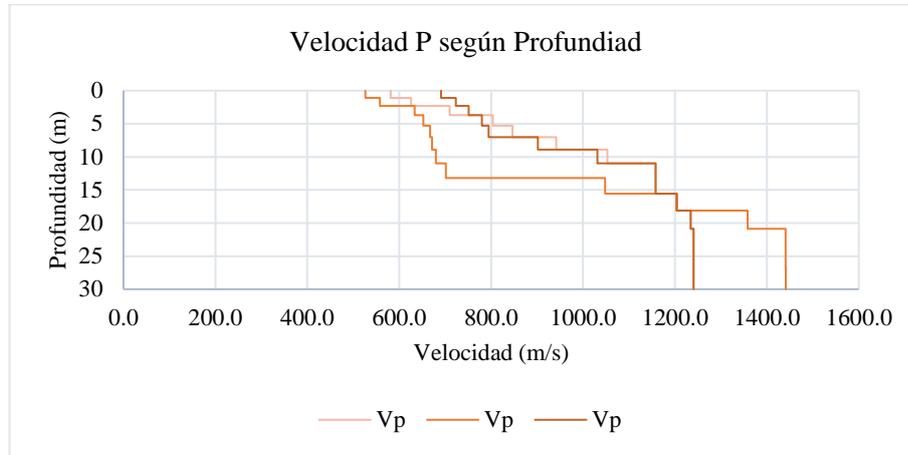
3.5.2.2 Datos del Perfil Sísmica de Refracción

Posterior de obtener los perfiles sísmicos a partir de la inversión, se recopila una tabla con los datos de velocidad de ondas P, para cada shot realizado en el ensayo de refracción. Llevándolo a un Excel se aplica fórmulas, promedios y otros datos estadísticos con el fin de obtener parámetros dinámicos a partir de este valor y el de Vs. A su vez se analiza las velocidades presentes según la distancia D alcanzada que ayuda determinar el límite suelo/roca.

Tabla 19.
Valores obtenidos del perfil Sísmica de Refracción

LS - 01		LS - 02		LS - 03	
Vp (m/s)	D (m)	Vp (m/s)	D (m)	Vp (m/s)	D (m)
581.4	0	526.4	0	691.0	0
581.4	1.071	526.4	1.071	691.0	1.071
626.1	1.071	558.3	1.071	723.1	1.071
626.1	2.308	558.3	2.308	723.1	2.308
709.5	2.308	633.6	2.308	751.1	2.308
709.5	3.709	633.6	3.709	751.1	3.709
803.6	3.709	652.3	3.709	779.5	3.709
803.6	5.275	652.3	5.275	779.5	5.275
846.2	5.275	667.3	5.275	794.6	5.275
846.2	7.005	667.3	7.005	794.6	7.005
941.7	7.005	671.6	7.005	901.7	7.005
941.7	8.901	671.6	8.901	901.7	8.901
1052.9	8.901	679.8	8.901	1031.2	8.901
1052.9	10.962	679.8	10.962	1031.2	10.962
1158.1	10.962	701.3	10.962	1158.1	10.962
1158.1	13.187	701.3	13.187	1158.1	13.187
1158.1	13.187	1048.2	13.187	1158.1	13.187
1158.1	15.577	1048.2	15.577	1158.1	15.577
1204.1	15.577	1203.7	15.577	1204.2	15.577
1204.1	18.132	1203.7	18.132	1204.2	18.132
1234.3	18.132	1358.0	18.132	1234.4	18.132
1234.3	20.852	1358.0	20.852	1234.4	20.852
1240.5	20.852	1440.8	20.852	1240.5	20.852
1240.5	23.736	1440.8	23.736	1240.5	23.736
1240.5	23.736	1441.0	23.736	1240.5	23.736
1240.5	26.786	1441.0	26.786	1240.5	26.786
1240.5	26.786	1441.1	26.786	1240.5	26.786
1240.5	30	1441.1	30	1240.5	30

Figura 47.
Velocidad de propagación (Vp) en los 30m de estudio.

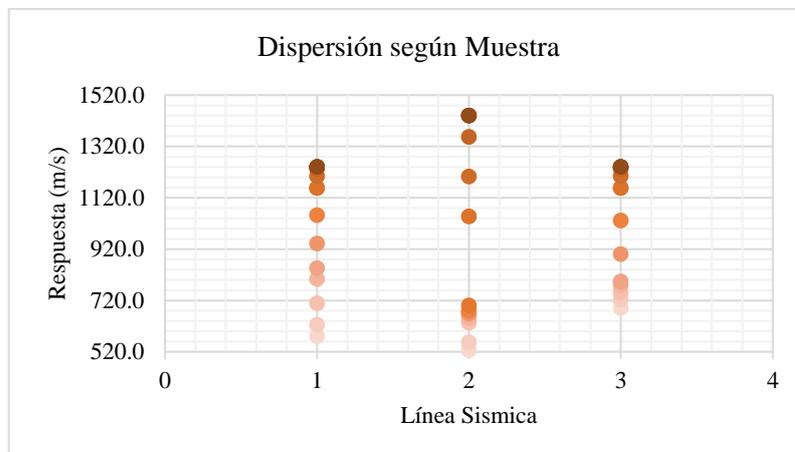


Se realizó el análisis estadístico normal sobre el total de datos obtenidos en cada muestra, de Línea Sísmica con los valores de Onda P (m/s).

Tabla 20.
Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P

LS	Recuento	Promedio	Mediana	Varianza	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Rango
01	28	1002,68	1105,45	58354,9	241,568	581,4	1240,5	659,1
02	28	930,243	690,55	131262,	362,301	526,4	1441,1	914,7
03	28	1010,61	1094,65	48454,0	220,123	691,0	1240,5	549,5
Total	84	981,175	1039,7	78768,0	280,656	526,4	1441,1	914,7

Figura 48.
Dispersión de velocidades según muestras LS



3.5.2.3 Establecer los parámetros dinámicos

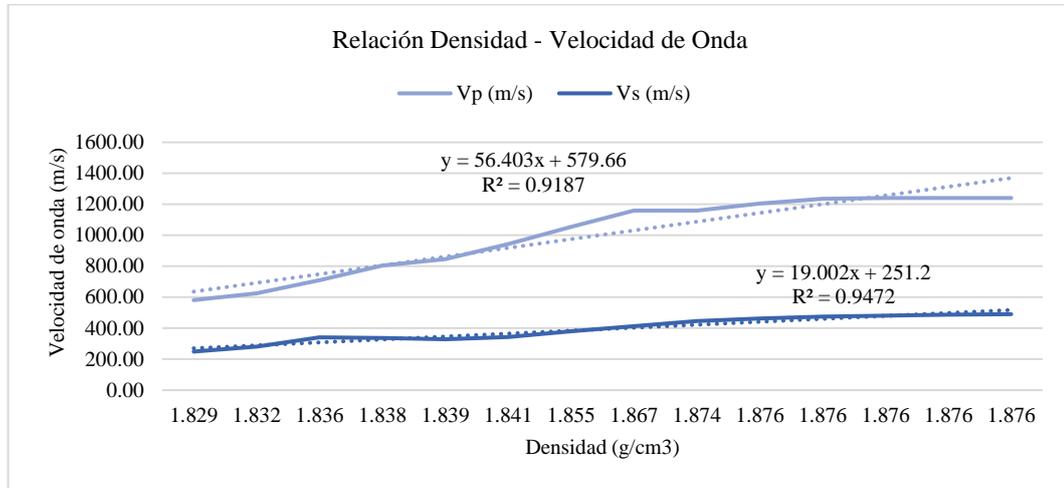
En este apartado se realiza la aplicación de las fórmulas establecidas para el desarrollo del segundo objetivo (cálculo de los parámetros dinámicos del subsuelo de EVAR), partiendo de los valores de velocidad de ondas P y ondas S calculadas durante la obtención de los perfiles sísmicos. Adicionalmente el cálculo de dichos parámetros está condicionado al valor de la densidad, por lo que inicialmente se debía establecer el valor de esta a diferentes profundidades en cada línea, pero no se cuenta con una técnica o equipo especializado que permita el cálculo directo en campo de esta propiedad.

Considerando las dificultades mencionadas anteriormente se optó por tomar muestras mediante el ensayo MASW en las líneas sísmicas donde se habían hecho previamente los ensayos de refracción y fue posible correlacionar directamente la densidad con los resultados arrojados en los ensayos, ejemplo como se muestra a continuación en la tabla 21.

Tabla 21.
Resultados de los ensayos de densidad LS – 01 y MASW – 01

Profundidad (m)	Densidad Promedio (g/cm³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
1.07	1.829	581.40	249.00
2.31	1.832	626.08	281.50
3.71	1.836	709.52	340.00
5.28	1.838	803.64	336.00
7.01	1.839	846.23	329.00
8.90	1.841	941.74	343.00
10.96	1.855	1052.90	379.50
13.19	1.867	1158.10	412.50
15.58	1.874	1158.10	446.00
18.13	1.876	1204.13	463.00
20.85	1.876	1234.35	474.00
23.74	1.876	1240.46	481.50
26.79	1.876	1240.46	486.50
30.00	1.876	1240.46	490.50

Figura 49.
Relación densidad con velocidades de onda P y onda S



Se puede apreciar en la figura 49, la correlación entre la velocidad de la onda S con respecto a la densidad, es la que mejor se ajusta, con un coeficiente de correlación de 0,95, es decir tiene un porcentaje de error mínimo. Por lo que se opta trabajar con las densidades a partir de esta velocidad. Una vez establecida la densidad en términos de una variable ya conocida, es posible proceder al cálculo de las propiedades dinámicas a baja deformación en cada uno de los puntos MASW con relación a las líneas sísmicas pertenecientes, como ya se mencionó se tienen datos de la velocidad de onda P y de onda S a lo largo de estas, A continuación, se presentan las fórmulas utilizadas en el cálculo.

Tabla 22.
Fórmulas de parámetros elástico dinámicos

Nombre, Simbología, Unid. Mpa	Fórmula	En función de Vs
Coeficiente de Poisson (ν)	$\nu = \frac{3k - 2G}{2(3K - G)}$	$\frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$
Módulo de Rigidez (G)	$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$	ρV_s^2
Módulo de Young (E)	$E = 2G(1 + \nu)$	$2 V_s^2 \rho(1 + \nu)$
Módulo de Bulk (K)	$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	$V_p^2 \cdot \rho - \frac{4 \cdot V_s^2 \cdot \rho}{3}$

Figura 50.
Perfil de velocidades sísmicas LS 01 – MASW 01

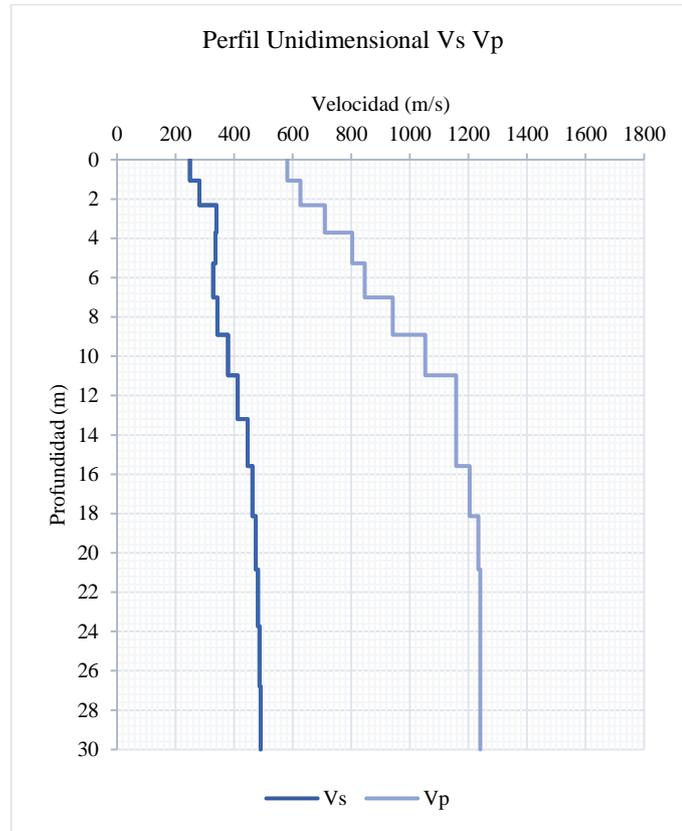


Tabla 23.
Parámetros elásticos de los perfiles LS 01 – MASW 01

Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m ³)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte (Kg/cm ²)	Módulo de Young (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm ²)
1.07	581	249	1.8	0.35	1156.9	3120.2	3433.5
2.31	626	282	1.8	0.33	1481.2	3943.8	3897.0
3.71	710	340	1.8	0.31	2165.5	5653.9	4843.2
5.28	804	336	1.8	0.36	2117.1	5743.0	6662.7
7.01	846	329	1.8	0.38	2030.9	5594.5	7603.2
8.90	942	343	1.8	0.39	2210.5	6160.3	9635.1
10.96	1053	380	1.9	0.40	2726.7	7611.8	12174.8
13.19	1158	413	1.9	0.40	3241.3	9065.3	14871.4
15.58	1158	446	1.9	0.38	3803.8	10497.3	14562.2
18.13	1204	463	1.9	0.38	4104.0	11329.2	15769.4
20.85	1234	474	1.9	0.38	4301.3	11876.8	16578.3
23.74	1240	482	1.9	0.38	4438.5	12230.7	16680.1
26.79	1240	487	1.9	0.38	4531.2	12461.0	16618.3
30.00	1240	491	1.9	0.37	4606.0	12646.1	16568.4

Nota. Parámetros elásticos para el área de investigación Nuevo Amata. Elaboración propia.

Figura 51.
Perfil de velocidades sísmicas LS 02 – MASW 02

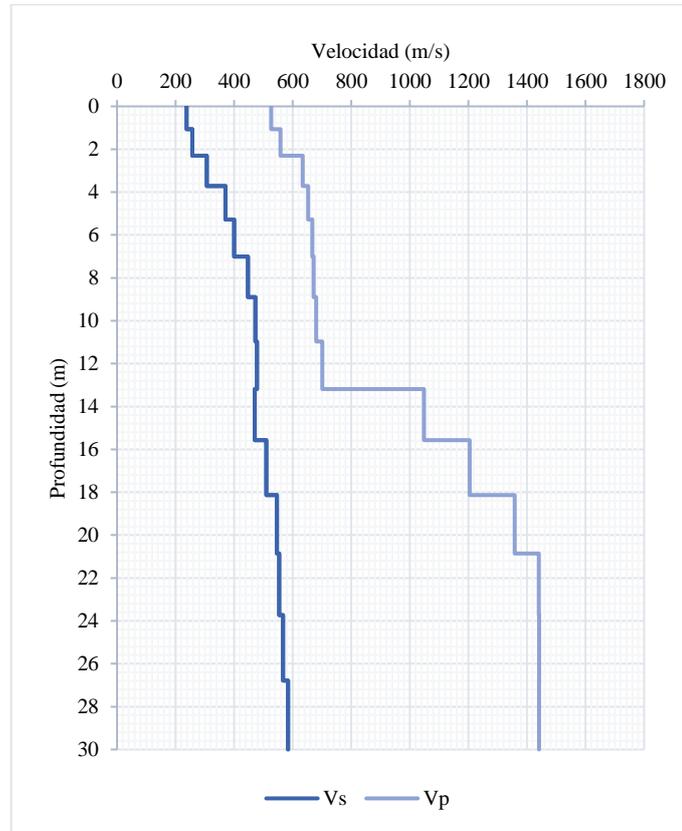


Tabla 24.
Parámetros elásticos de los perfiles LS 02 – MASW 02

Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m ³)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte (Kg/cm ²)	Módulo de Young (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm ²)
1.07	526	238	1.8	0.33	1041.9	2771.5	2717.1
2.31	558	257	1.8	0.32	1228.3	3248.2	3045.1
3.71	634	307	1.8	0.30	1761.1	4580.6	3827.4
5.28	652	371	1.9	0.21	2597.7	6294.3	3636.3
7.01	667	400	1.9	0.17	3036.8	7115.2	3610.1
8.90	672	447	1.9	0.07	3823.0	8206.4	3205.2
10.96	680	473	1.9	0.02	4299.5	8790.5	3066.7
13.19	701	478	1.9	0.05	4402.9	9223.7	3397.0
15.58	1048	471	1.9	0.33	4264.9	11361.3	11268.2
18.13	1204	510	1.9	0.35	5044.3	13643.7	15405.5
20.85	1358	546	1.9	0.37	5837.5	15972.3	20181.0
23.74	1441	554	1.9	0.38	5998.9	16563.1	23101.2
26.79	1441	567	1.9	0.37	6284.0	17273.2	22915.8
30.00	1441	584	1.9	0.37	6678.3	18242.5	22657.9

Nota. Parámetros elásticos para el área de investigación Nuevo Amata. Elaboración propia.

Figura 52.
Perfil de velocidades sísmicas LS 03 – MASW 03

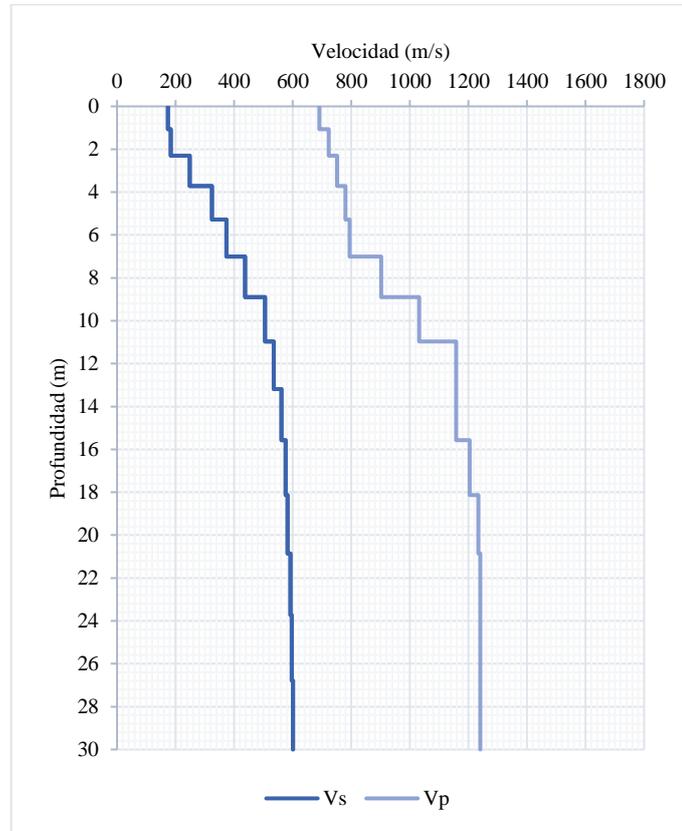


Tabla 25.
Parámetros elásticos de los perfiles LS 03 – MASW 03

Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m ³)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte (Kg/cm ²)	Módulo de Young (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm ²)
1.07	691	174	1.8	0.45	563.3	1634.7	5563.3
2.31	723	183	1.8	0.45	626.0	1815.8	6098.1
3.71	751	249	1.8	0.41	1156.8	3269.4	6274.0
5.28	780	324	1.8	0.36	1965.5	5340.1	6286.5
7.01	795	374	1.8	0.31	2617.4	6877.0	6152.6
8.90	902	437	1.8	0.30	3588.0	9331.7	7791.4
10.96	1031	505	1.9	0.30	4828.3	12511.3	10202.6
13.19	1158	536	1.9	0.32	5462.5	14425.8	13390.6
15.58	1158	562	1.9	0.30	6029.0	15677.9	13078.8
18.13	1204	576	1.9	0.31	6340.7	16569.6	14280.1
20.85	1234	582	1.9	0.31	6484.7	17021.4	15123.8
23.74	1240	592	1.9	0.31	6709.5	17541.6	15166.1
26.79	1240	596	1.9	0.30	6806.2	17751.7	15101.7
30.00	1240	601	1.9	0.30	6915.0	17986.5	15029.1

Nota. Parámetros elásticos para el área de investigación Nuevo Amata. Elaboración propia.

Figura 53.
Perfil de velocidades sísmicas LS 04 – MASW 04

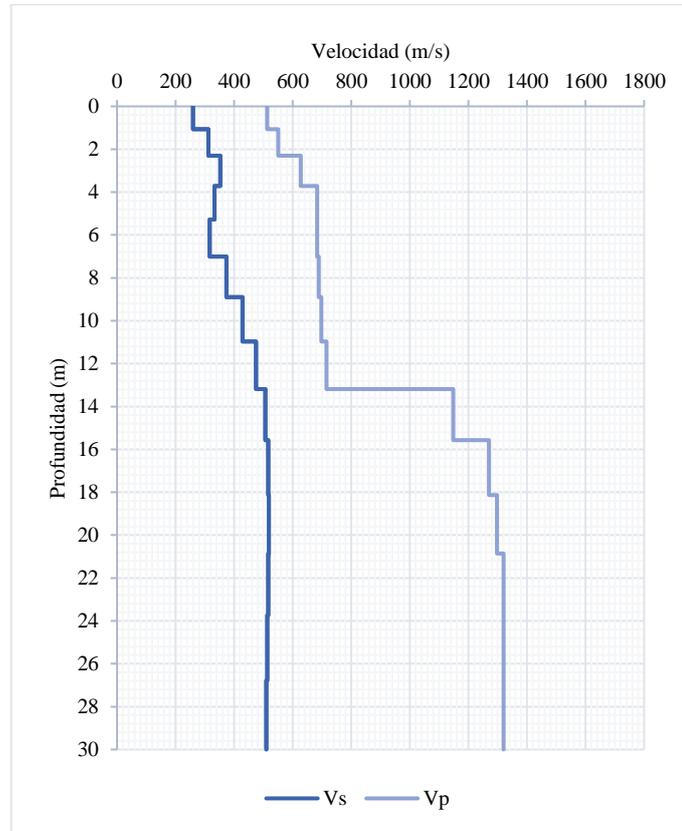


Tabla 26.
Parámetros elásticos de los perfiles LS 04 – MASW 04

Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m ³)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte (Kg/cm ²)	Módulo de Young (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm ²)
1.07	513	260	1.8	0.28	1256.5	3215.7	2431.8
2.31	551	313	1.8	0.21	1825.3	4424.5	2560.1
3.71	627	353	1.8	0.22	2334.3	5685.1	3356.8
5.28	683	333	1.8	0.30	2079.5	5397.4	4448.9
7.01	683	316	1.8	0.32	1873.5	4947.3	4589.2
8.90	689	374	1.8	0.24	2628.1	6519.8	4185.9
10.96	698	429	1.9	0.15	3484.4	8020.8	3829.9
13.19	715	475	1.9	0.07	4297.9	9239.5	3622.3
15.58	1148	506	1.9	0.34	4896.0	13108.1	13539.4
18.13	1270	516	1.9	0.37	5097.4	13915.9	17181.8
20.85	1297	519	1.9	0.37	5146.9	14100.6	18052.6
23.74	1320	517	1.9	0.38	5107.2	14051.6	18833.5
26.79	1320	513	1.9	0.38	5038.3	13880.1	18879.5
30.00	1320	510	1.9	0.38	4969.7	13709.2	18925.2

Nota. Parámetros elásticos para el área de investigación Nuevo Amata. Elaboración propia.

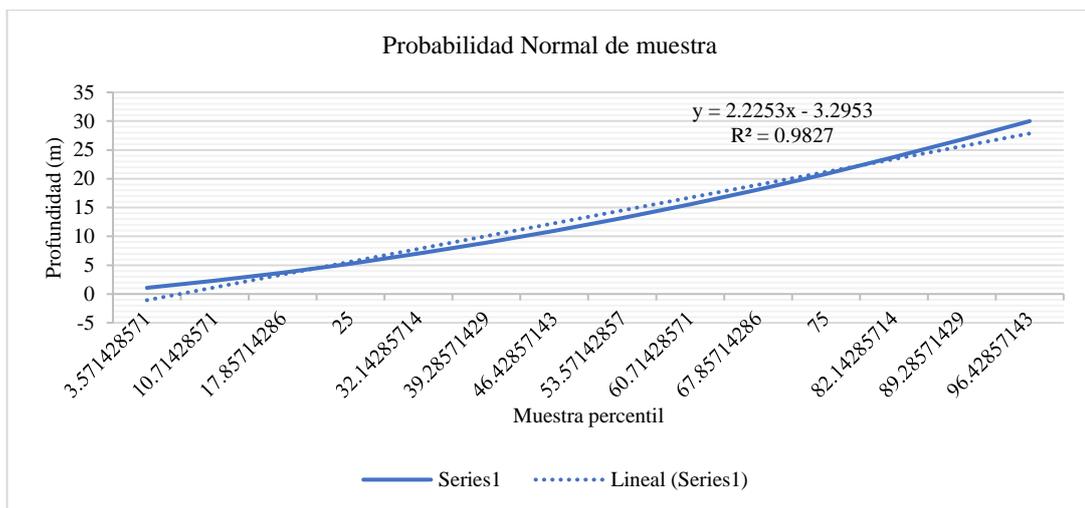
La estadística de los datos de cada muestra se ajusta un modelo de regresión lineal múltiple, tomando como variable dependiente a la profundidad (m) y las variables independientes a V_p (m/s), módulo de Corte (Kg/cm^2), modulo Volumétrico K_d (Kg/cm^2). Afirmando la relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 27.
Resumen estadístico de regresión

Estadísticas de la regresión múltiple	
Coefficiente de correlación múltiple	0.99%
Coefficiente de determinación R^2	0.98%
R^2 ajustado	0.87%
Error típico	2.49
Observaciones de muestra	14

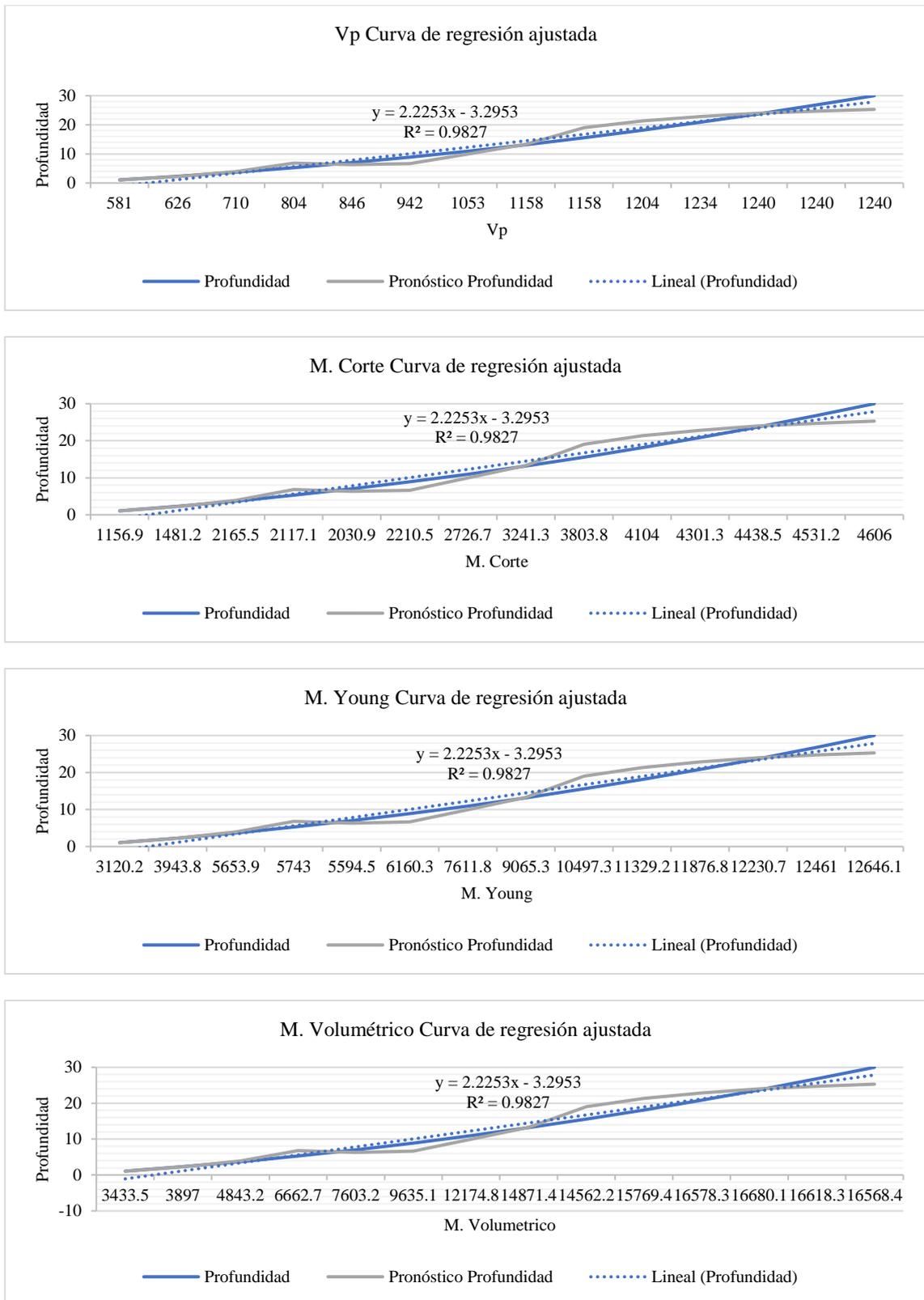
Variables	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
V_p	-0.02	0.00	-3.49	0.01	-0.03	-0.01
M. Corte	-0.09	0.07	-1.30	0.22	-0.25	0.07
M. Young	0.04	0.03	1.40	0.19	-0.02	0.10
M. Volumétrico	0.00	0.00	-0.93	0.38	-0.01	0.00

Figura 54.
Probabilidad Normal de muestra



Nota. Prueba de Normalidad. Elaboración Propia.

Figura 55.
Curva de regresión ajustada de las variables



Nota. Prueba de Normalidad. Elaboración Propia.



CAPÍTULO IV

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1 Aspectos generales

4.1.1 Ubicación

Nuevo Amata se encuentra ubicado a 1 km al sureste del poblado Amata. Geográficamente, se encuentra en el distrito de Coalaque, Provincia General Sánchez Cerro, Región de Moquegua al sur de Perú en las coordenadas geográficas Latitud 16°37'11.42"S, Longitud 71° 4'48.83"O. A una altitud de 3200 m s.n.m. como se muestra en la figura 56, enmarcada por las siguientes coordenadas locales UTM datum WGS 84 zona geodésica 19S.

Tabla 28.
Coordenadas del área de estudio

Área de estudio - Nuevo Amata	
277790 E	8161565 N
278290 E	8161565 N
278290 E	8161065 N
277790 E	8161065 N

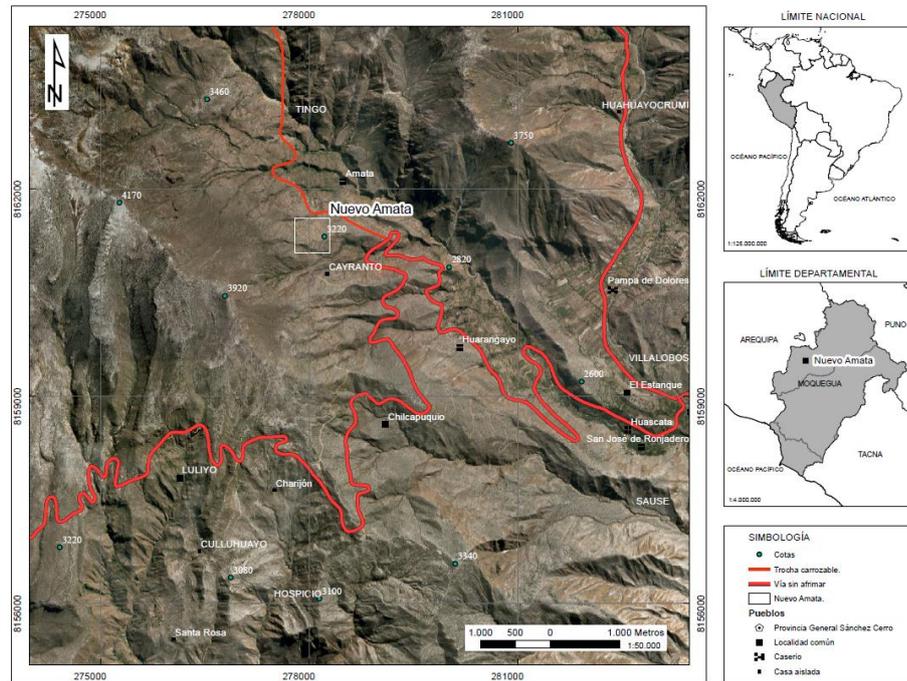
4.1.2 Acceso

El acceso al área de estudio se realiza por la vía Arequipa – Moquegua, teniendo como punto de partida la ciudad de Arequipa en dirección al distrito de Sabandia. Nuevo Amata es accesible por trocha carrozable y completa el recorrido con una distancia total de 89 km.

Tabla 29.
Vía de acceso al área de estudio

Tramo	Tiempo	Distancia	Tipo de Vía
Arequipa – Pocsi	56 minutos	26.9 Km	34D, Afirmada
Pocsi - Amata	1 hora 23 minutos	62 km	MO-108, Trocha carrozable

Figura 56.
Ubicación y acceso al área de estudio Nuevo Amata



Nota. Mapa de ubicación y acceso a Nuevo Amata. Elaboración Propia.

4.1.3 Clima

Según la clasificación climática de Thornthwaite (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, 2010), el área de estudio indica un clima: C (o, i, p) C'H2: Semiseco, frío y seco y de temperaturas máximas que oscilan entre 15 °C y 20 °C y las mínimas entre 5 °C y 7 °C. En el distrito de Puquina las lluvias duran del 10 de enero al 10 de marzo. El 2 de febrero de 2021 debido a intensas precipitaciones pluviales se produjo un deslizamiento en el sector de Amata que ocasionó el embalse del río Amarillo (reporte de peligro inminente COEN – INDECI), la tabla 30 muestra la altura de precipitación medidas según promedios mensuales a partir del 2013 a la actualidad.

Tabla 30.
Promedio mensual de lluvia en Puquina

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Precipitación total (mm)/día	14.4	17.4	11.1	1.7	0.2	0.3	0.6	0.5	0.4	0.5	0.5	3.6	51.2

Nota. Precipitación Puquina. Tomado de Weather Spark.com por, Atmósfera estándar internacional ISA; MERRA-2.

4.2 Aspecto geológico

El área de estudio está ubicada en la Carta Geológica de Perú a escala 1:100,000 del Instituto Geológico Minero Metalúrgico INGEMMET en el cuadrángulo Puquina Hoja 34-t1. La geología de Nuevo Amata está compuesta principalmente por rocas de la formación Cachios (Jm-ca) del grupo Yura, secuencia constituida por arcillitas de capas delgadas, las que se intercalan con estratos de areniscas, seguido por depósitos coluviales y cubierto con depósitos de caída de lapilli de pómez del volcán Huaynaputina. mismo que se encuentra a 24 km al noroeste del área. Estos fueron descritos por (Atencio y Romero, 2000).

4.2.1 Unidad litoestratigráfica

Las unidades litoestratigráficas observadas a nivel local corresponden a secuencias sedimentarias del Grupo Yura (formaciones Puente y Cachios) del Jurásico. Además, afloran rocas gneises antiguas del complejo basal de la costa, también rocas Volcano-Sedimentarias de la Formación Sencca y depósitos de cenizas del Complejo Cerro Blanco del Plioceno, además se muestran depósitos del cuaternario, representados por secuencias sedimentarias de tipo Coluvial y Aluvial. (Figura 57, Mapa geológico local), (Tabla 31, Unidad litoestratigráfica local).

4.2.1.1 Complejo basal de la costa Gneis (*Npe – gn*)

Aflora a 1.7 km al noreste del área de estudio, representado por rocas tipo gneises, que conforman la unidad geológica más antigua. Sus principales afloramientos se localizan en el valle de Coalaque hacia el sector de Omate. Esta unidad se encuentra asociada a vetas de cuarzo poco deformadas (Atencio y Romero, 2000).



4.2.1.2 Grupo Yura

Unidad litoestratigráfica con mayor extensión conformada por un conjunto siliciclástico de un grosor aproximado de 2000 m; Actualmente está subdividida en 5 formaciones por su comprobada extensión regional. Las formaciones en la zona de estudio se han identificado como susceptibles a deslizamientos y derrumbes.

4.2.1.2.1 Formación Puente (*Jm – pu*)

Representado por una secuencia de rocas clásticas que consisten en afloramientos masivos de areniscas cuarzosas de grano medio, color pardo, estratos decrecientes de 40 a 20 cm de grosor con estratificación sesgada, intercaladas con lutitas fosilíferas de 30 a 60 cm de grosor, con algunas intercalaciones de derrames volcánicos (Atencio y Romero, 2000). Las areniscas están estratificadas en capas delgadas con disyunción en lajas, susceptible a movimientos en masa. Constituida por areniscas grises y pardas, intercaladas con lutitas negras carbonosas asociada a un ambiente de depositación de abanico submarino (Quispesivana y Zapata, 2000)

4.2.1.2.2 Formación Cachios (*Jm – ca*)

Corresponde a una secuencia de arcillitas de colores negros, grises, verdes, marrones, pardo amarillentas, se presentan en capas delgadas, apreciándose algunas estructuras fácilmente deleznable; con frecuentes nódulos de núcleo mayormente arenoso de grano fino. Estas capas se intercalan con estratos de areniscas de colores claros, con cemento calcáreo y nódulos calcáreos fosilíferos de ammonites y restos de plantas (Atencio y Romero, 2000).



En la zona de estudio se tienen afloramientos de lutitas y areniscas gris oscuras, de susceptibilidad moderada a movimientos en masa. A su vez Quispesivana y Zapata, (2000) describen a la formación como secuencias negativas de lutitas carbonosas negras, intercaladas con areniscas grises de grano fino y slumpings en sus niveles intermedios.

4.2.1.3 *Grupo Maure (Nm-ma)*

El Grupo Maure está conformado por tres secuencias: volcánicas sedimentarias, piroclástica y lávica. En su parte inferior, las secuencias volcánicas sedimentarias se componen de conglomerados, limo areniscas y brechas. En la parte media afloran calizas de hasta 1.5 m de grosor, intercaladas con rocas volcanoclásticas.

4.2.1.4 *Formación Sencca (Np-se)*

Conformada por ignimbritas de composición riolítica de color rojizo, ricas en cristales de biotita, observándose también cristales de cuarzo, plagioclasa, pómez y fragmentos líticos. Esta formación sobreyace discordantemente al Grupo Maure, Grupo Yura (Formaciones Puente y Cachíos) (Atencio y Romero, 2000). La formación compone conglomerados de tobas en matriz arcillosa de color marrón. Sobreyaciendo a esta secuencia se encuentran depósitos de caída de lapilli de pómez, correspondiente a la última erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.c.

4.2.1.5 *Grupo Barroso*

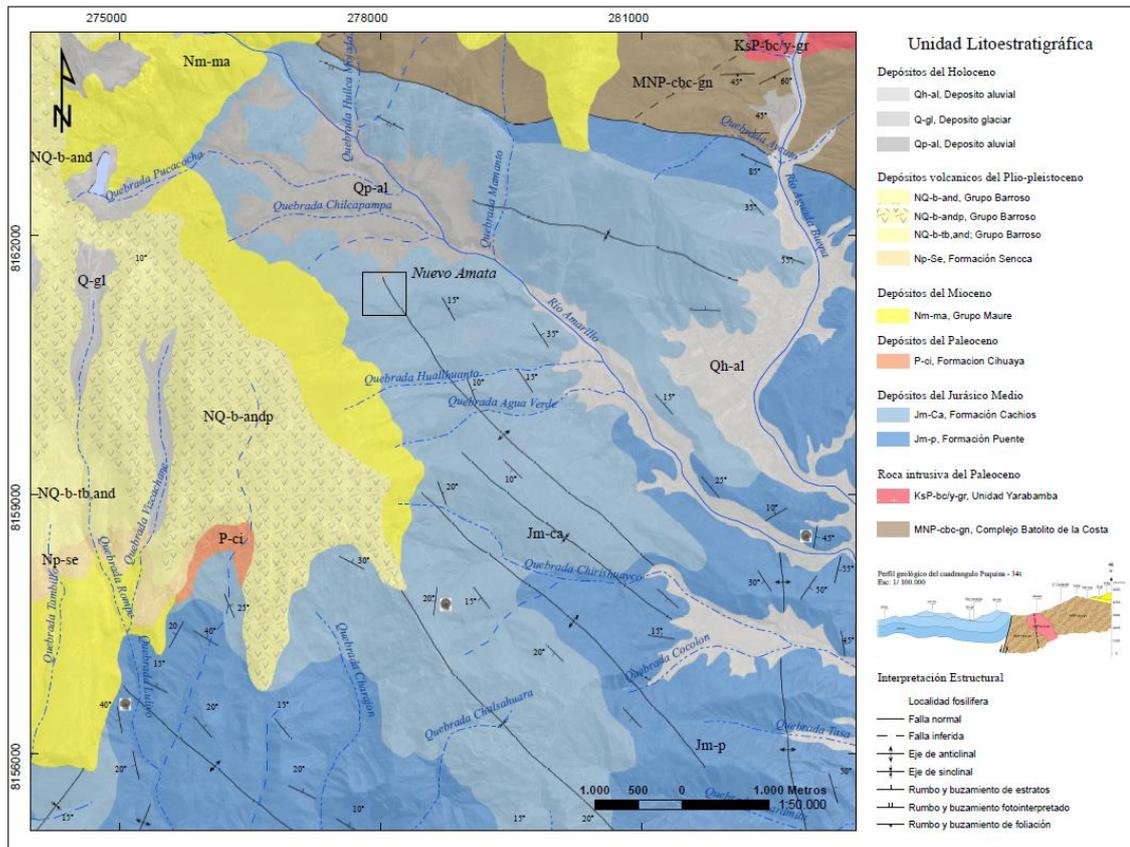
4.2.1.5.1 *Complejo Volcánico Cerro Blanco, Cerro Sataico (NQ – b- tandp)*

Aflora a 6 km al Noreste de Nuevo Amata. En el complejo volcánico se puede reconocer tres secuencias lávicas: la secuencia inferior corresponde a un flujo lávico traquiandesítico gris oscuro, seguido de una secuencia de lavas andesíticas grises, lavas porfiríticas grises de composición andesítica.

4.2.1.6 Depósito Aluvial (*Qh, Qp – al*)

Del cuaternario formados por depósitos sedimentarios, litológicamente corresponde a gravas, arenas, arcillas, cenizas re trabajadas y cantos redondeados que cubren indistintamente a los diversos afloramientos, tienen un espesor apreciable, de niveles estratigráficos y conforman terrazas más desarrolladas especialmente en el margen del valle fluvial de Amata y bordes del rio Amarillo, aguada buena (Quispesivana y Zapata, 2000).

Figura 57.
Mapa geológico local del área de estudio



Nota. Mapa geológico local de Nuevo Amata. Tomado y modificado de (Quispesivana y Zapata, 2017).

Tabla 31.
Unidad litoestratigráfica local del área de estudio

Eratema	Sistema	Serie	Unidad Litoestr. g.	Columna Estratigráfica - Área de Estudio Nuevo Amata	Espesor	Descripción	Detalles
CENOZOICO	Cuaternario	Holocena	Suelo		30cm	Suelo reciente	
			Depósito de Lapilli		Aprox. 1.10cm	Depósitos erosionados producto de la última erupción del volcán Huaynaputina	Color blanquecino, las pómez miden 0.5 cm de diámetro, redondeadas. Restos líticos oxidados y accesorios, angulosas.
			Depósito Coluvial		Aprox. 1.40cm	Compuestos por gravas envueltas en una matriz limo arcillosa; con clastos de granodiorita y areniscas. Producto de la alt y desprendimiento in situ, de espesores hasta >5m	Apariencia de conos o pequeños abanicos de menor potencia, Acumulaciones locales sin mucho transporte. Resistencia baja por lluvias intensas
MESOZOICO	Jurásico	Medio	Gp. Yura Formación Cachios		Aprox. >2.0m	Lutitas y/o arcillitas grises, marrones en capas delgadas. Se intercalan con algunos lechos de areniscas de colores grises y verdes de grano fino y nódulos calcáreos de ammonites fácilmente deleznable	En la zona de estudio se tiene afloramientos de arcillitas, de moderada susceptibilidad a movimientos en masa
			Gp. Yura Formación Puente		Aprox. 0.30 – 1.0m	Areniscas y arcillitas Aflora a 1.6 km al noreste de la zona de estudio. Representado por areniscas cuarzosas de grano fino, color pardo. Intercalada con lutitas carbonosas arriñonadas y algunas intercalaciones de derrames volcánicos.	Aflora a 1.6 km al noreste de la zona de estudio. En aquellos lugares donde las areniscas se tornan más cuarzosas, los mantos varían de grosor de 0.30 a 1.00 m.
CENOZOICO	Paleógeno	Eocena	Unidad Yarabamba			Granito , Roca intrusiva de la Superunidad Yarabamba	Aflora a 5 km al noreste de la zona de estudio. Formando cuerpos tabulares y alargados en dirección NO-SE.
PROTEROZOICO	Neo proterozoico		Complejo Basal de la costa			Gneis , Rocas metamórficas, unidad geológica más antigua	Aflora a 3 km al noreste de la zona de estudio. Asociado a vetas de cuarzo

Nota. Unidad Litoestratigráfica de Nuevo Amata. Tomado y modificado de (Atencio y Romero, 2000)



4.3 Aspecto geomorfológico

El área de estudio está ubicada en la carta geomorfológica de la cuenca del Río Tambo a escala 1:300,000 del Instituto Geológico Minero Metalúrgico INGEMMET. El relieve de la superficie de la localidad de Amata corresponde a montañas en rocas sedimentarias (RM-rs), con laderas de pendientes entre 35° a 45° resultado de la interacción de fuerzas, agentes exógenos (movimientos en masa), y procesos endógenos (sismicidad y volcanismo) suscitados en el del tiempo, factores que controlan el modelado del relieve, factores tectónicos, volcánicos y geomorfológicos. Estos fueron descritos por Luque et al (2020).

4.3.1 Unidad geomorfológica

Las unidades geomorfológicas observadas a nivel local corresponden a origen tectónico-degradacional, unidades de estrato volcán y domo volcánico geoforma perteneciente al vocal Huaynaputina. Piedemonte (coluvio-deluvial, aluvio-torrencial). Áreas cubiertas con depósitos Morrénicos. (figura 58, Mapa geomorfológico local) Los paisajes morfológicos resultan de los procesos denudativos parte de las cadenas montañosas, en este grupo la siguiente unidad:

4.3.1.1 Unidad de montaña

Se consideran dentro de esta unidad a las geoformas que alcanzan alturas mayores a los 3000 metros respecto al nivel de base local. Se reconocen como cumbres y estribaciones producto de las deformaciones sufridas por la erosión y la influencia de otros sucesos (levantamiento, glaciación, etc.). Esta unidad se distribuye en las siguientes subunidades:



4.3.1.1.1 Relieve de montaña en roca volcánica (RM -rv)

Relieve agreste con pendientes de hasta 70° se presenta formando las altas cumbres del área de estudio. Litológicamente compuesto por (andesitas y traquiandesitas porfiríticas, toba, lava andesítica del Grupo Barroso) de estructuras volcánicas, sus elevaciones alcanzan los 4360 m s.n.m. Esta subunidad es susceptible a derrumbes y caídas de rocas.

4.3.1.1.2 Relieve de montaña en roca volcano-sedimentaria (RM-rvs)

Relieve con pendientes erosionadas, litológicamente compuesta por limolitas tobáceas, tobas retrabajadas, areniscas tobáceas y conglomerados del grupo Maure, también compone áreas de la formación Sencca. Esta subunidad se asociadas a caídas, derrumbes, deslizamientos, erosión en cárcavas, presenta crestas altas e irregulares, con pendientes que pueden superar los 25°, la altitud de las montañas desde el fondo de valle del río Amarillo hasta la cima corresponde de 2700 a 3920m s.n.m.

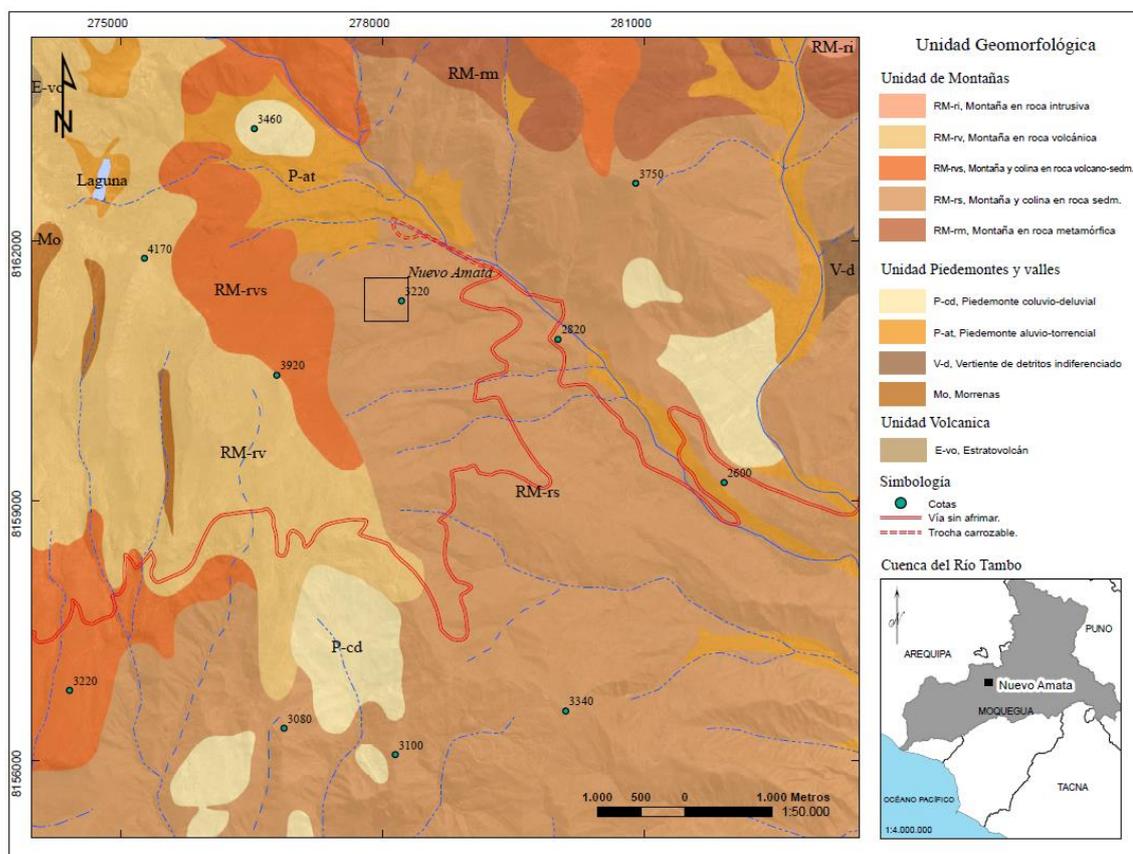
4.3.1.1.3 Relieve de montaña estructural en roca sedimentaria (RM-rs)

Aquí pertenece el área plateada para reubicación Nuevo Amata, conformada por anticlinales y sinclinales con superficies onduladas y disectadas por quebradas ligeramente profundas, una característica particular en las imágenes satelitales; tienen un alineamiento de dirección NO – SE. Litológicamente está compuesto por rocas sedimentarias de la formación Cachios y Puente del grupo Yura, albergando así las pampas fosilíferas de la provincia de Coalaque. Esta subunidad es muy susceptible a generar caídas de rocas, deslizamientos y derrumbes. Sus elevaciones alcanzan los 3750 m.s.n.m.

4.3.1.1.4 Piedemonte y valles

De subunidad geomorfológica que comprende a Piedemonte coluvio-deluvial (P-cd); vertiente o piedemonte aluvio-torrencial (proluvial) P-at. Litológicamente compuesto por acumulación de grava, arena, limo y arcilla con clastos sub angulosos a angulosos perteneciente a depósitos aluviales del sistema cuaternario. Sus elevaciones alcanzan los 2700 m.s.n.m., considerado parte de la laguna Pucacocha y quebradas activas.

Figura 58.
Mapa geomorfológico local del área de estudio



4.4 Aspecto Hidrogeológico

El área de estudio está ubicada en la carta Hidrogeológica de la cuenca del río Tambo a escala 1:300,000 del Instituto Geológico Minero Metalúrgico INGEMMET. Pertenece a la subcuenca del río Amarillo en el poblado de Amata. La clasificación de acuífero al que pertenece Nuevo Amata es fisurado sedimentario del grupo Yura (AFS-yu) de ambiente idóneo para la circulación de agua subterránea principalmente en épocas lluviosas. Estos fueron descritos por (Carpio y Peña, 2020).

4.4.1 Unidad Hidrogeológica

Las unidades hidrogeológicas existentes en la localidad corresponden al tipo acuífero, relacionado a aguas pluviales que infiltran el suelo hasta llegar a una formación y/o grupo litoestratigráfico permeable, permitiendo la circulación y almacenamiento del agua subterránea por medio de sus poros, grietas, fisuras. Figura 59, Mapa hidrogeológico local.

4.4.1.1 Acuífero

4.4.1.1.1 Volcánico sedimentario del grupo Maure (AVS-ma)

De litología aglomerados volcánicos tipo *debris flow*, intercalado con coladas andesíticas y areniscas verdes tobáceas. Esta unidad se caracteriza por presentar intercalación de secuencias sedimentarias y volcánicas, en sectores tiene litología variada producto de la deposición de rocas volcánicas y sedimentarias.

4.4.1.1.2 Fisurado volcánico del grupo Barroso (AFV-ba)

De litología andesita porfiríticas, vesicular, roca volcánica alterada, dacita porfiríticas, lavas traquiandesíticas, andesitas porfiríticas. Tiene una extensión de carácter fracturado y permeable (fracturas verticales y abiertas) permiten la recarga de acuífero.



4.4.1.1.3 Fisurado sedimentario del grupo Yura (AFS-yu)

El área de investigación pertenece a esta clasificación hidrogeológica, de litología compuesta por areniscas cuarzosas en estratos medios a gruesos, intercaladas con lutitas, que presentan fracturamiento, haciendo así un ambiente idóneo para la circulación de agua subterráneas. Estos acuíferos se encuentran distribuidos regionalmente y existen casos particulares donde presentan emanaciones termales que indican una circulación profunda de aguas subterráneas.

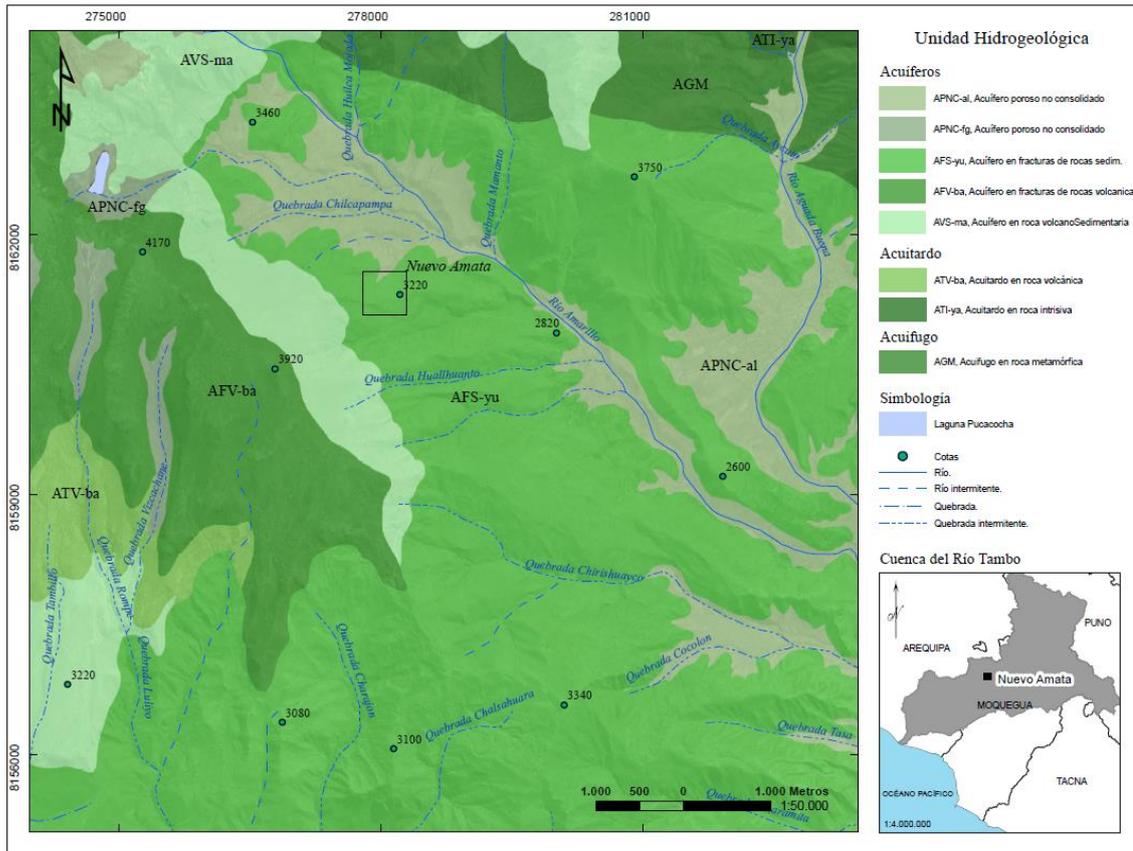
4.4.1.1.4 Poroso no consolidado de depósito fluvioglacial (APNC-fg)

Abarca depósitos glaciares, litológicamente compuesto por guijarros en matriz areno-limosa intercaladas con arenas, clastos en matriz areno-limosa, aglomerados sedimentarios, bloques angulosos a sub angulosos. Posee porosidad primaria con espacios vacíos entre ellos que facilita la libre circulación y almacenamiento de agua subterránea.

4.4.1.1.5 Poroso no consolidado de depósito aluvial (APNC-al)

Describe una litología compuesta de gravas, conglomerados y arenas mal seleccionadas en matriz limo-arenosa y areno-limosa, al igual que los depósitos fluvioglaciares le caracteriza la permeabilidad de sus materiales siendo aptos para el almacenamiento de agua subterráneas.

Figura 59.
Mapa hidrogeológico local del área de estudio



Nota. Mapa hidrogeológico local de Nuevo Amata. Tomado y modificado de (Carpio y Peña, 2020) (Gómez, 2020).

4.5 Aspecto geodinámico

En el área de estudio se identifican procesos de erosión de ladera en forma de surcos y cárcavas, a la altitud de 3200 m s.n.m, geomorfológicamente ubicado en una ladera de montaña con pendiente pronunciada presentando acumulación de material coluvial, depósitos de caída de lapilli pómez y ceniza de la erupción del volcán Huaynaputina ocurrido en el año 1600.

4.5.1 Erosión de laderas (cárcavas)

En época de lluvias intensas sus materiales son afectados por erosión de ladera (cárcavas), figura 60, según la evaluación de peligros geológicos realizado el 2019 por INGEMMET, se ha evidenciado en algunos sectores que las cárcavas que tienen anchos máximos de 3 a 5m y profundidades de 2 a 5 m, el material erosionado aporta material suelto a las quebradas contribuyendo a la generación de flujos no canalizados.

Figura 60.
Erosión de laderas cercanas a Nuevo Amata



Nota. Erosión de laderas cercanas a Nuevo Amata. Tomado de (Soncco y Vela, 2019).

La ocurrencia de movimientos en masa está estrechamente relacionado a factores desencadenantes como lluvias de gran intensidad o gran duración asociadas a eventos excepcionales y sismos. Mientras que los factores condicionantes o intrínsecos que favorecen la ocurrencia de movimientos en masa son la litología (calidad de la roca y permeabilidad), morfología y pendiente del terreno (Soncco y Vela, 2019).



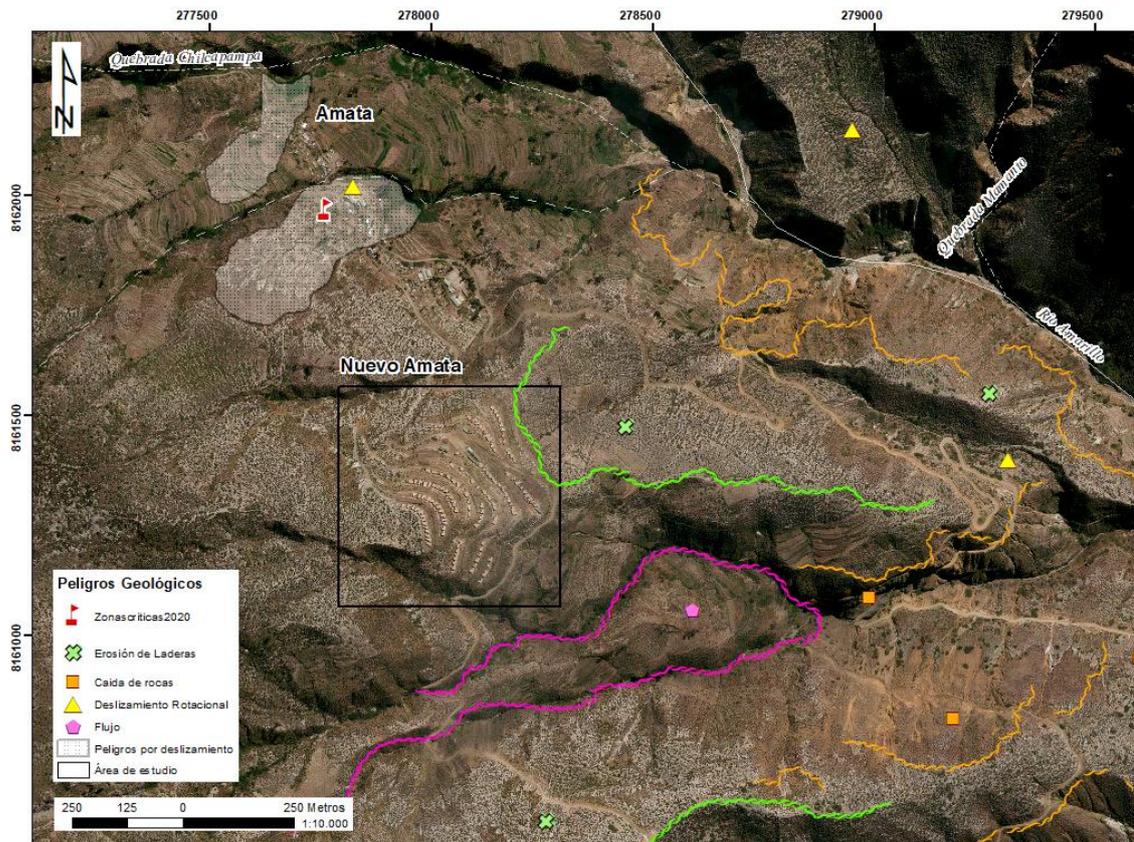
4.5.2 Deslizamientos

En el sector de Amata a 500 metros al noreste de Nuevo Amata se ha identificado un escarpe de deslizamiento activo donde se aprecia evidencias de colapso, el que corresponde a un deslizamiento de tipo rotacional (figura 61), mientras que en el área de estudio no se ha encontrado indicios de asentamiento de terrenos que indiquen la formación de un deslizamiento.

Cabe resaltar que la saturación de suelos o roca alterada por intensas lluvias, deforestación de tierras, erosión fluvial, erosión de laderas (cárcavas), modificación de taludes de corte, actividad sísmica y volcánicas son algunos de los factores que desencadenan los deslizamientos de tierra.

Según Luque et al (2020) afirman que el poblado de Amata presenta alta susceptibilidad a los movimientos en masa, donde confluyen la mayoría de condiciones del terreno favorables a generar movimientos en masa cuando se modifican sus taludes, a la vez colinda con zonas de muy alta susceptibilidad. Es por ello que recomiendan restringir el desarrollo de infraestructura urbana o de instalaciones para una alta concentración de población, mientras en el caso de infraestructura vial, líneas de energía, actividad minera, etc., se deberán realizar estudios geotécnicos de detalle.

Figura 61.
Mapa de peligros geológicos del área de estudio



Nota. Mapa de peligros geológicos cercanas a Nuevo Amata. Tomado y modificado de (Luque et al., 2020) (Carpio y Peña, 2020)



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados

En el siguiente capítulo se exponen los resultados del estudio, que corresponde a lo planteado en los objetivos específicos, y se presenta mediante perfiles unidimensionales, perfiles sísmicos y perfiles eléctricos con su respectiva interpretación contrastada en la base geológica del área de estudio. La información obtenida con los valores de velocidad de onda y la resistividad de los materiales permitirá una caracterización geotécnica, determinando las propiedades físicas y dinámicas del subsuelo del área de EVAR, Nuevo Amata.

5.1.1 Perfil unidimensional

El producto la aplicación del método Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) es la variación subsuperficial de la velocidad de la onda de cizallamiento (V_s) en formato 1D, para ello se presenta la descripción de los perfiles unidimensionales obtenidas en las muestras realizadas. A su vez, la aplicación de este método generó resultados confiables de (V_s) a la profundidad de 30 metros, que fueron ubicados en el punto central de las líneas sísmicas.

Además, se obtuvo el promedio de la velocidad de ondas de corte en los 30 metros más superficiales del terreno (V_{s30}), parámetro con el que se definirá el tipo de suelo perteneciente de acuerdo a la clasificación de las normativas sismorresistentes. E.030, IBC.



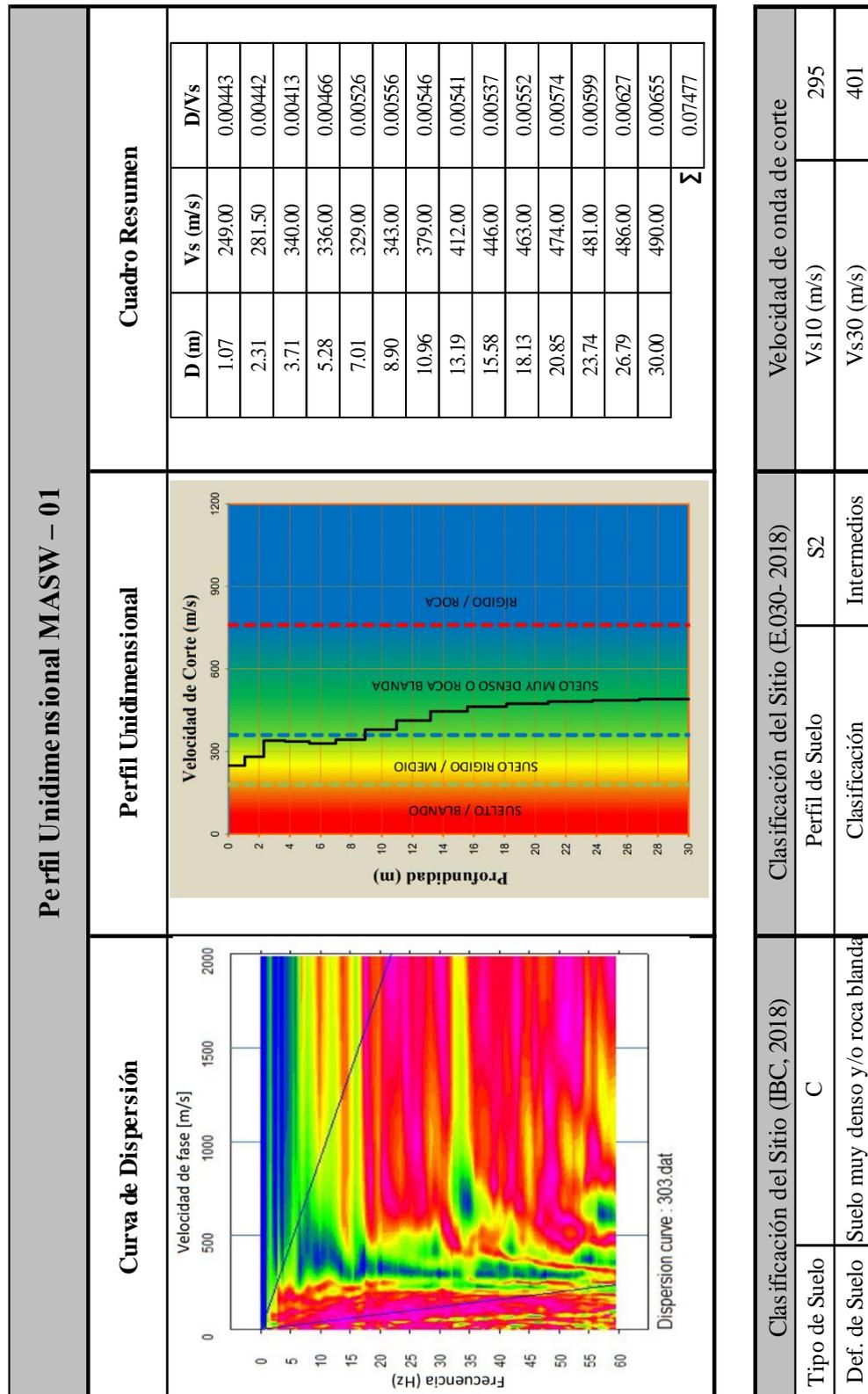
5.1.1.1 Perfil unidimensional MASW – 01

La interpretación del perfil unidimensional MASW – 01, ubicado en la Línea Sísmica 01, confirma la existencia de tres estratos el cual es agrupado en dos estratos principales según el rango de velocidad establecido por la norma (IBC – ASCE 7), donde la velocidad de corte varía de forma moderada con respecto a la profundidad investigada. El perfil unidimensional correspondiente al MASW - 01 se presenta en la figura 62, considerando la curva de dispersión que corresponde, al igual que el cuadro resumen de las velocidades obtenidas.

- El primer estrato presenta velocidad de propagación de onda **S (Vs) entre 249.0 – 343.0 m/s**, llega alcanzar una profundidad de 8.9 metros y corresponde a un **suelo rígido**.
- El segundo estrato con **(Vs) entre 379.5 – 463.0 m/s**, llega alcanzar una profundidad de 18.13 metros y corresponde a un **suelo muy denso y/o roca blanda**.
- El tercer estrato con **(Vs) entre 474.0 – 490.50 m/s**, ubicado por debajo de los 18.13 metros llega alcanzar los 30.00 metros de profundidad, corresponde a un **suelo muy denso y/o roca blanda** de resistencia media asociada a rocas de mediana competencia en términos de alteración y grado de fracturación.

La velocidad de propagación para los 30 metros (**Vs30**) es de **401 m/s**, correspondiendo según E.030 a un tipo de suelos intermedios/ medianamente rígidos (S2), según IBC un tipo de suelo muy denso y/o roca blanda (C).

Figura 62.
Perfil Unidimensional MASW – 01



Nota. Perfil Unidimensional y clasificación de suelo para el área de estudio Nuevo Amata. Elaboración Propia.



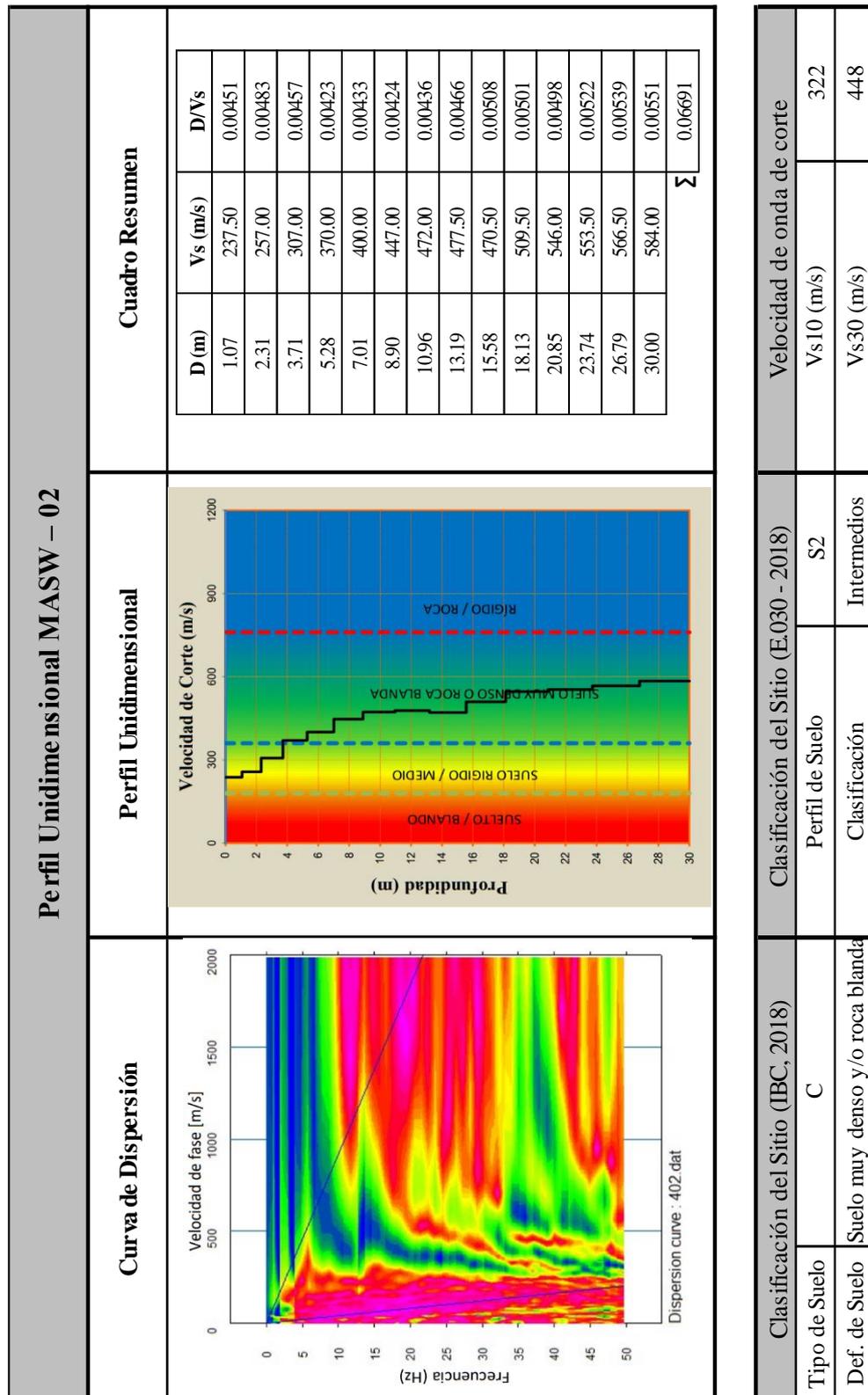
5.1.1.2 Perfil unidimensional MASW – 02

La interpretación del perfil unidimensional MASW – 02, ubicado en la Línea Sísmica 02, confirma la existencia de tres estratos el cual es agrupado en dos estratos principales según el rango de velocidad establecido (IBC - ASCE7), donde la velocidad de corte varía de forma moderada con respecto a la profundidad investigada. El perfil unidimensional correspondiente al MASW - 01 se presenta en la figura 63, donde se considera la curva de dispersión al igual que el cuadro resumen de las velocidades obtenidas.

- El primer estrato presenta velocidad de propagación de onda **S (Vs) entre 237.5 – 307.0 m/s**, llega alcanzar una profundidad de 3.71 metros y corresponde a un **suelo rígido**.
- El segundo estrato con **(Vs) entre 370.50 – 509.50 m/s**, llega alcanzar una profundidad de 18.13 metros y corresponde a un **suelo muy denso y/o roca blanda**.
- El tercer estrato con **(Vs) entre 546.0 – 584.0 m/s**, ubicado por debajo de los 18.13 llega alcanzar los 30.00 metros de profundidad, corresponde a un **suelo muy denso y/o roca blanda** de resistencia media asociada a rocas de mediana competencia en términos de alteración y grado de fracturación.

La velocidad de propagación para los 30 metros **(Vs30) es de 448 m/s**, correspondiendo así según E.030 un tipo de suelos intermedios/ medianamente rígidos (S2), según IBC un tipo de suelo muy denso y/o roca blanda (C).

Figura 63.
Perfil Unidimensional MASW – 02



Nota. Perfil Unidimensional y clasificación de suelo para el área de estudio Nuevo Amata. Elaboración Propia.



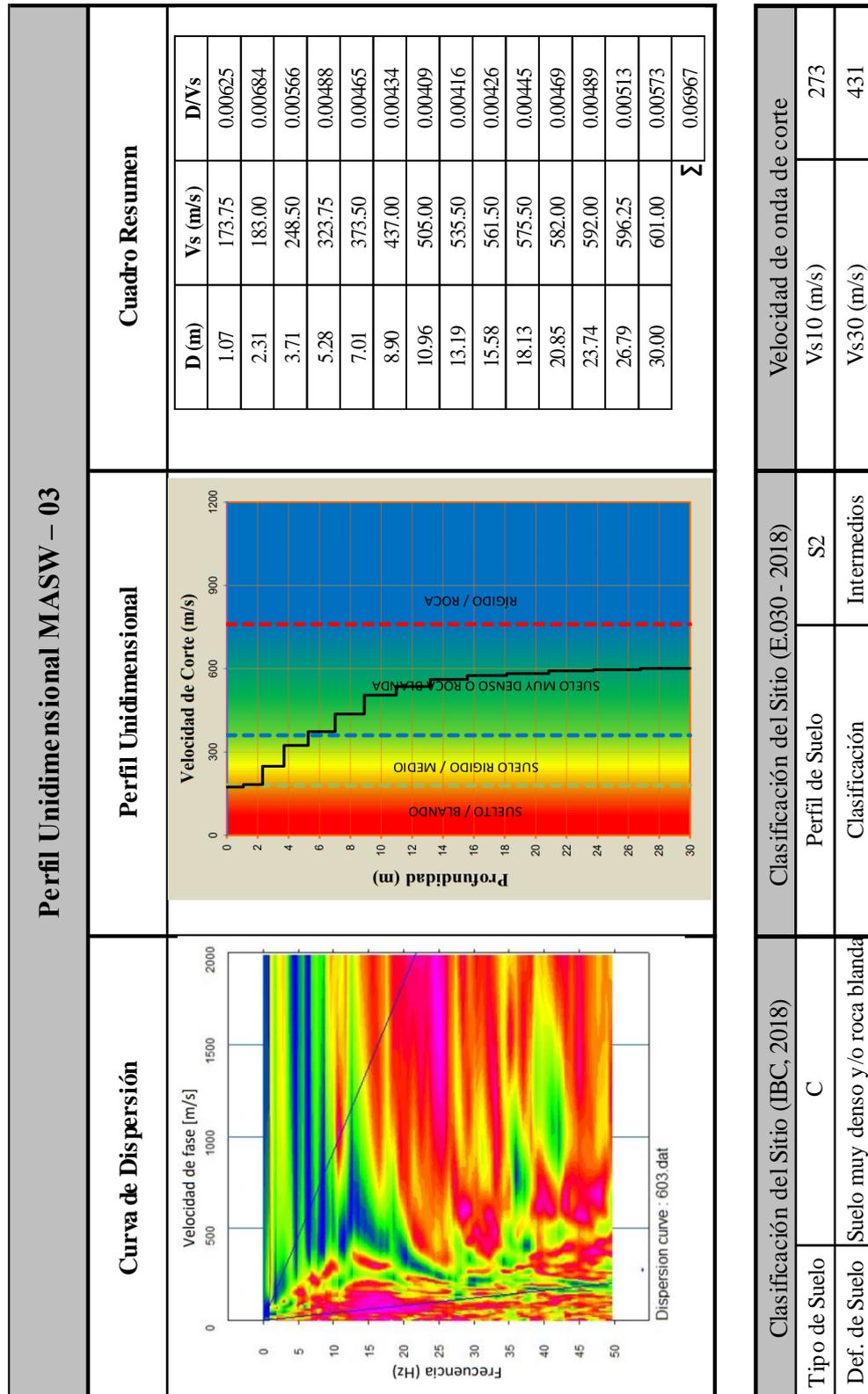
5.1.1.3 Perfil unidimensional MASW – 03

La interpretación del perfil unidimensional MASW – 03, ubicado en la Línea Sísmica 03, confirma la existencia de tres estratos el cual es agrupado en dos estratos principales según el rango de velocidad establecido (IBC - ASCE7), donde la velocidad de corte varía de forma moderada con respecto a la profundidad investigada. El perfil unidimensional correspondiente al MASW 03 se presenta en la figura 64, donde se considera la curva de dispersión al igual que el cuadro resumen de las velocidades obtenidas.

- El primer estrato presenta velocidad de propagación de onda **S (Vs) entre 173.75 – 437.00 m/s**, llega alcanzar una profundidad de 8.9 metros y corresponde a un **suelo rígido**.
- El segundo estrato con **(Vs) entre 505.0 – 575.5 m/s**, llega alcanzar una profundidad de 18.13 metros y corresponde a un **suelo muy denso y/o roca blanda**.
- El tercer estrato con **(Vs) entre 582.0 – 601.0 m/s**, ubicado por debajo de los 18.13 llega alcanzar los 30.00 metros de profundidad, corresponde a un **suelo muy denso y/o roca blanda** de resistencia media asociada a rocas de mediana competencia en términos de alteración y grado de fracturación.

La velocidad de propagación para los 30 metros **(Vs30) es de 431 m/s**, correspondiendo así según E.030 un tipo de suelos intermedios/ medianamente rígidos (S2), según IBC un tipo de suelo muy denso y/o roca blanda (C).

Figura 64.
Perfil Unidimensional MASW – 03



Nota. Perfil Unidimensional y clasificación de suelo para el área de estudio Nuevo Amata. Elaboración Propia.



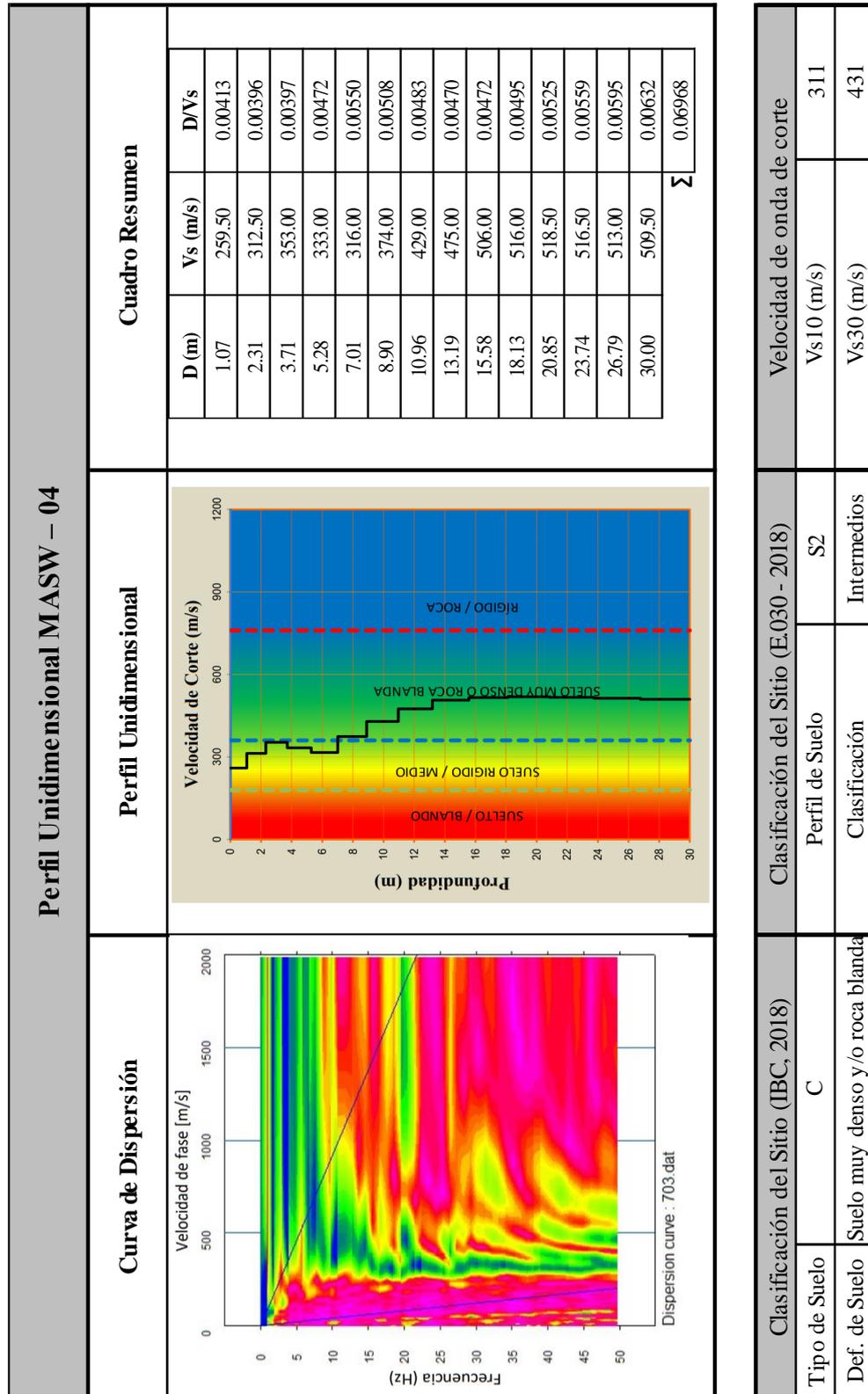
5.1.1.4 Perfil unidimensional MASW – 04

La interpretación del perfil unidimensional MASW – 04, ubicado en la Línea Sísmica 03, confirma la existencia de tres estratos el cual es agrupado en dos estratos principales según el rango de velocidad establecido (IBC - ASCE7), donde la velocidad de corte varía de forma moderada con respecto a la profundidad investigada. El perfil unidimensional correspondiente al MASW 04 se presenta en la figura 65, donde se considera la curva de dispersión al igual que el cuadro resumen de las velocidades obtenidas.

- El primer estrato presenta velocidad de propagación de onda **S (Vs) entre 259.5 – 374.0 m/s**, llega alcanzar una profundidad de 8.9 metros y corresponde a un **suelo rígido**.
- El segundo estrato con **(Vs) entre 429.0 – 516.0 m/s**, llega alcanzar una profundidad de 18.13 metros y corresponde a un **suelo muy denso y/o roca blanda**.
- El tercer estrato con **(Vs) entre 518.0 – 509 m/s**, ubicado por debajo de los 18.13 llega alcanzar los 30.00 metros de profundidad, corresponde a un **suelo muy denso y/o roca blanda** de resistencia media asociada a rocas de mediana competencia en términos de alteración y grado de fracturación.

La velocidad de propagación para los 30 metros **(Vs30) es de 431 m/s**, correspondiendo así según E.030 un tipo de suelos intermedios/ medianamente rígidos (S2), según IBC un tipo de suelo muy denso y/o roca blanda (C).

Figura 65.
Perfil Unidimensional MASW – 04



Nota. Perfil Unidimensional y clasificación de suelo para el área de estudio Nuevo Amata. Elaboración Propia.

5.1.2 Perfiles Sísmicos

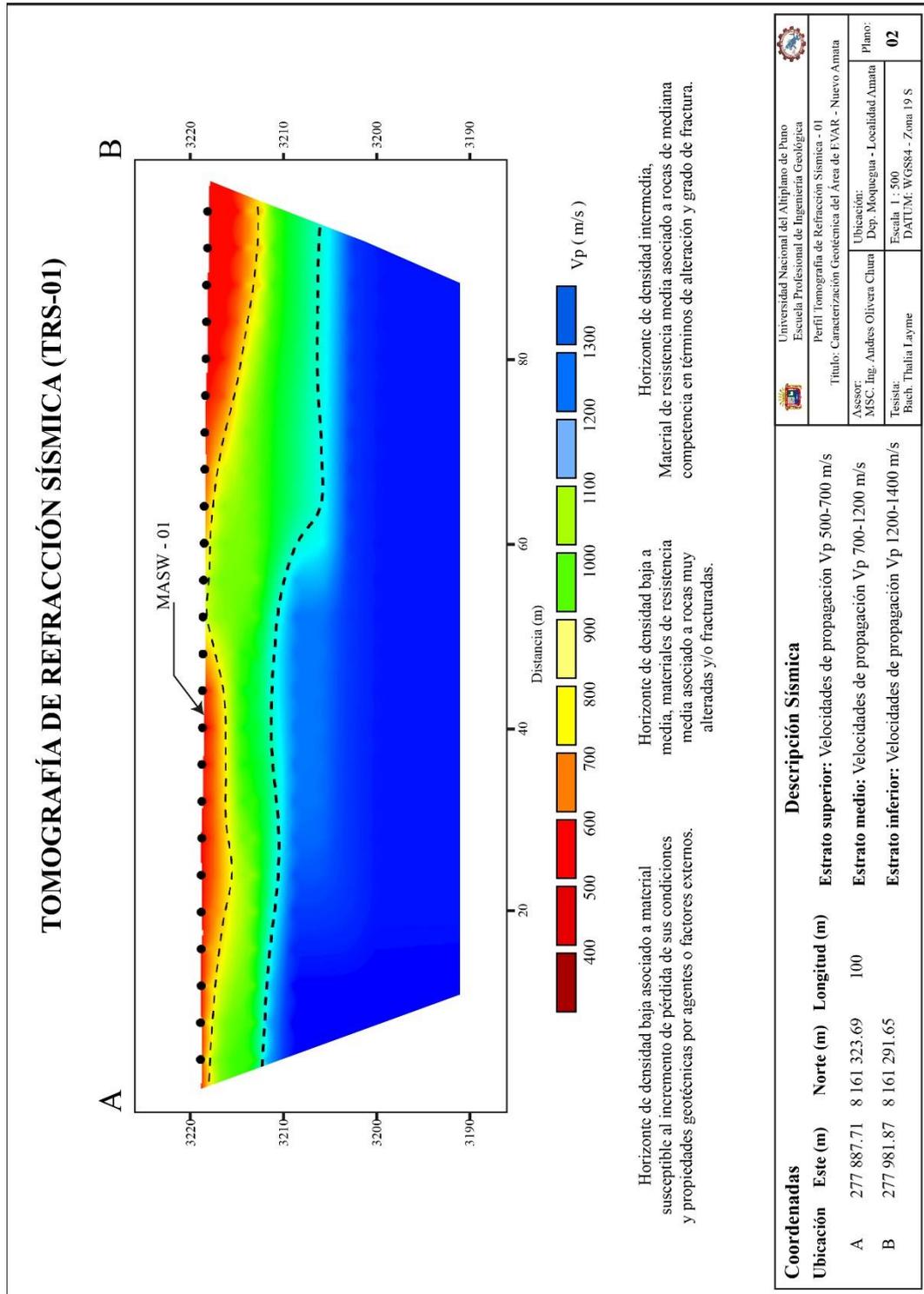
El producto de la aplicación del método Refracción Sísmica es la variación subsuperficial de la velocidad de la onda de compresión (V_p) en formato 2D, para ello se presenta los perfiles de tomografía sísmica, donde se analizan los materiales del subsuelo en función de su comportamiento dinámico.

5.1.2.1 Perfil Línea Sísmica – 01

El perfil se ha trazado en dirección NW – SE, con una longitud de 100 metros sobre la superficie del terreno, tal como se muestra el plano de exploración en planta, el perfil (LS – 01) a escala 1/500 (Figura 66). En este primer perfil A – B, se identificaron tres estratos sísmicos:

- El primer estrato presenta velocidad de onda **P (V_p) entre 500 – 700 m/s**, describe un suelo ligeramente compacto con profundidad que varía entre los 3.7 y 5.5 metros. Dinámicamente se refiere a un **horizonte de densidad baja** asociado a material susceptible al incremento de pérdida de sus condiciones y propiedades geotécnicas por agentes o factores externos.
- El segundo estrato presenta velocidades de ondas **P (V_p) entre 700 – 1200 m/s**, el cual describe a un material conformado por suelo medianamente compacto llegando alcanzar una profundidad que varía entre los 5.3 y 18.0 metros. Dinámicamente refiere a un **horizonte de densidad baja a media**, probablemente sedimentos de origen coluvial, rocas muy alteradas o fracturadas.
- El tercer estrato corresponde a velocidad de onda **P (V_p) sobre los 1200 m/s**, el cual según su ubicación estaría por debajo de los 18 metros hasta alcanzar los 30 metros de profundidad investigada. Dinámicamente se trataría de un **horizonte de densidad media**, material de resistencia media asociada a rocas de mediana competencia en términos de alteración y grado de fracturación.

Figura 66.
Perfil Línea Sísmica – 01



Nota. Perfil tomográfico de Refracción Sísmica para el área de estudio Nuevo Amata. Elaboración Propia.

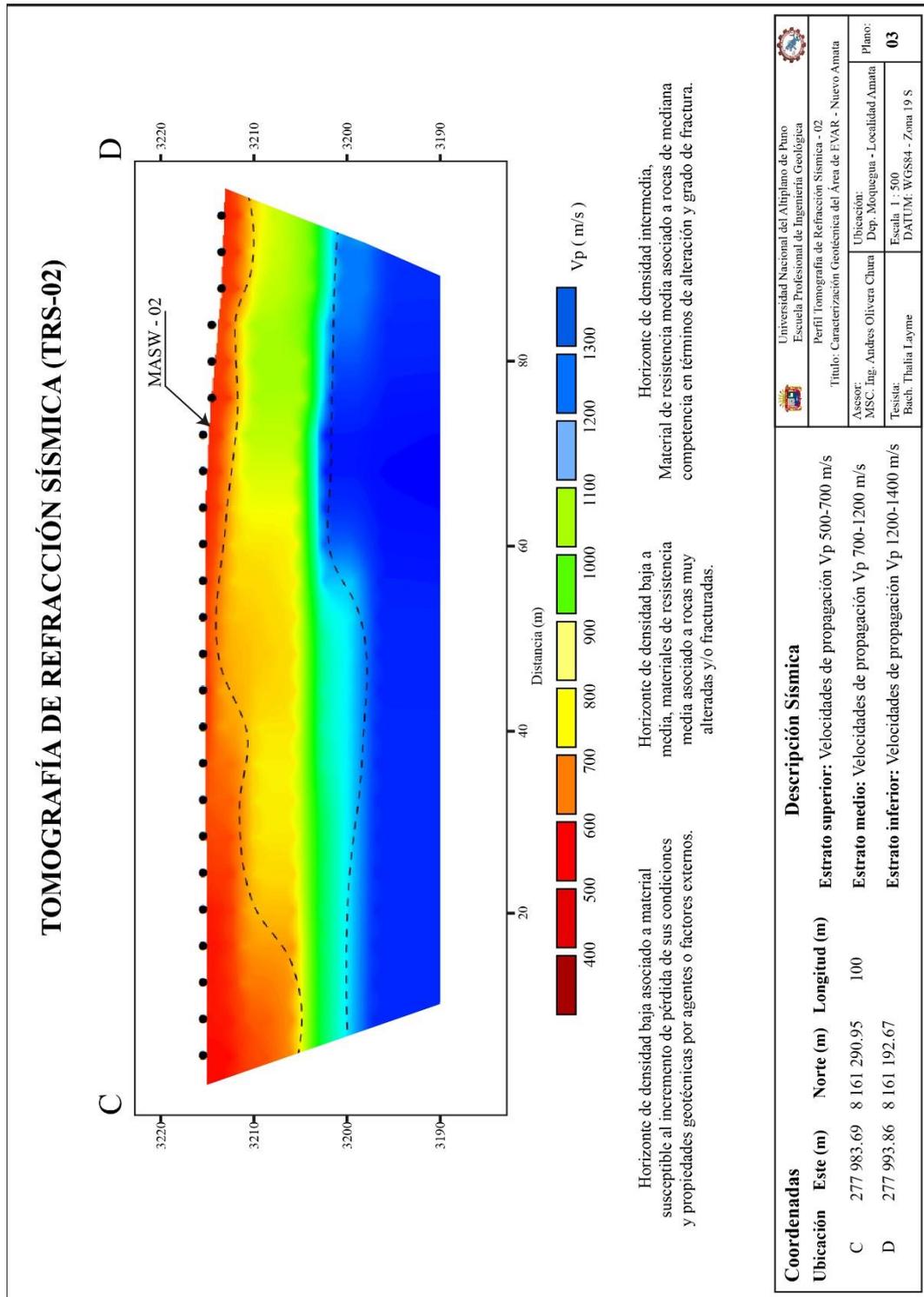


5.1.2.2 Perfil Línea Sísmica – 02

El perfil se ha trazado en dirección NW – SE, con una longitud de 100 metros sobre la superficie del terreno, tal como se muestra el plano de exploración en planta, el perfil (LS – 02) está a escala 1/500 (Figura 67). En este perfil C – D, se identificaron tres estratos sísmicos:

- El primer estrato presenta velocidad de onda **P (Vp) entre 500 – 700 m/s**, describe un suelo ligeramente compacto con profundidad que varía entre los 5.5 y 13.19 metros. Dinámicamente se refiere a un **horizonte de densidad baja** asociado a material susceptible al incremento de pérdida de sus condiciones y propiedades geotécnicas por agentes o factores externos.
- El segundo estrato presenta velocidad de onda **P (Vp) entre 700 – 1200 m/s**, el cual describe un suelo medianamente compacto llegando alcanzar una profundidad que varía entre los 5.5 y 18.0 metros. Dinámicamente refiere a un **horizonte de densidad baja a media**, materiales de resistencia media asociado a rocas muy alteradas y/o fracturadas.
- El tercer estrato corresponde a velocidad de ondas **P (Vp) entre 1200 – 1441 m/s**, describe a un material compacto el cual según su ubicación estaría por debajo de los 18 metros de profundidad, que en comparación del primer perfil este obtiene velocidades de 1358 m/s a los 20.85 metros y la velocidad de 1441m/s a partir de los 23.74 metros hasta alcanzar los 30 metros de profundidad investigada. Dinámicamente se trataría de un **horizonte de densidad media**, material de resistencia media a alta, asociada a rocas de mediana a buena competencia en términos de alteración y grado de fracturación. La sección interpretada a la línea sísmica 02 se expone a continuación.

Figura 67.
Perfil Línea Sísmica – 02



Nota. Perfil tomográfico de Refracción Sísmica para el área de estudio Nuevo Amata. Elaboración Propia.

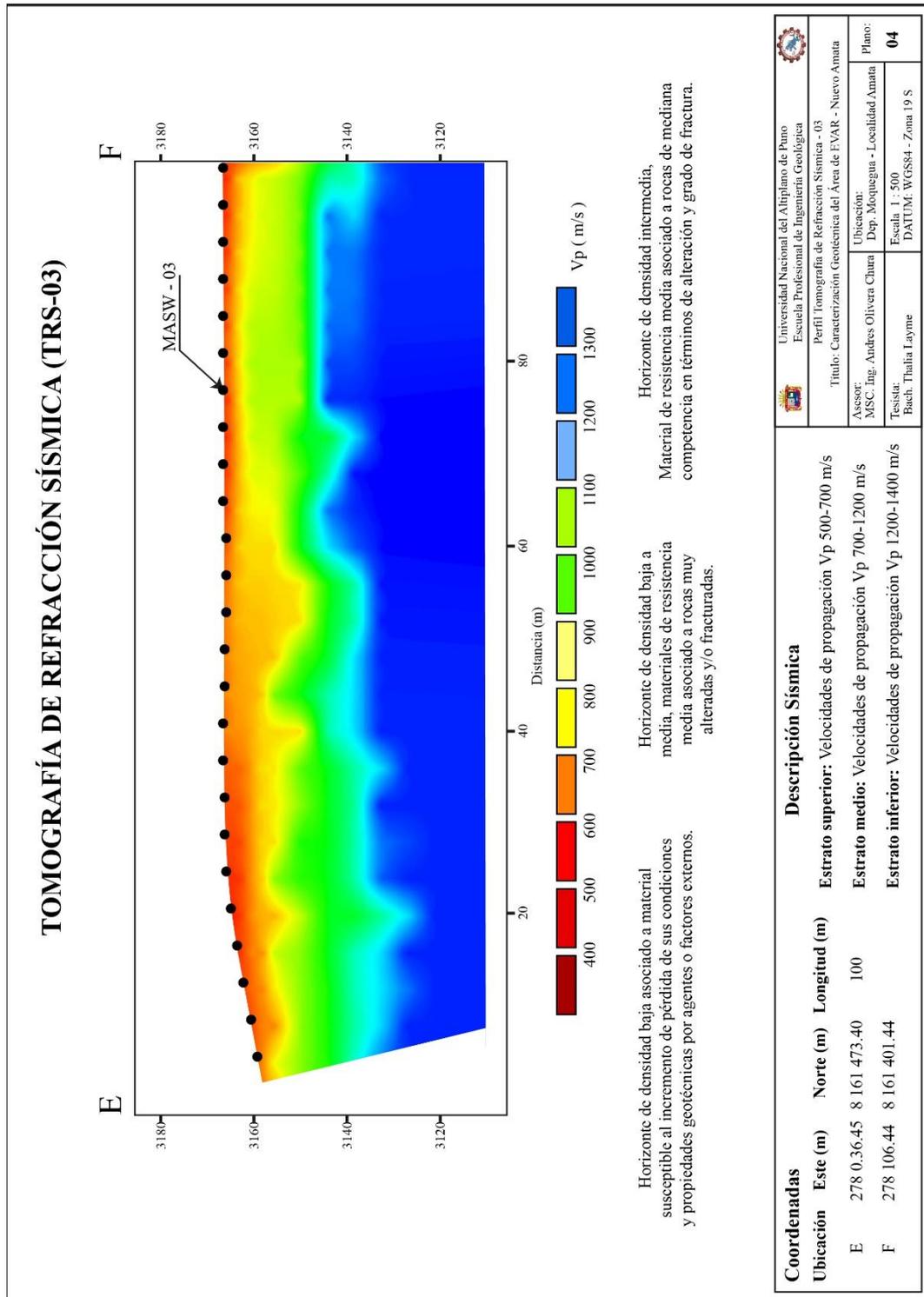


5.1.2.3 Perfil Línea Sísmica – 03

El perfil se ha trazado en dirección NW – SE, con una longitud de 200 metros sobre la superficie del terreno, tal como se muestra el plano de exploración en planta, el perfil (LS – 03) y su continuación (LS – 04) están a escala 1/500 (Figura 68, 69). En estos perfiles E – F, F – G, se identificaron tres estratos sísmicos:

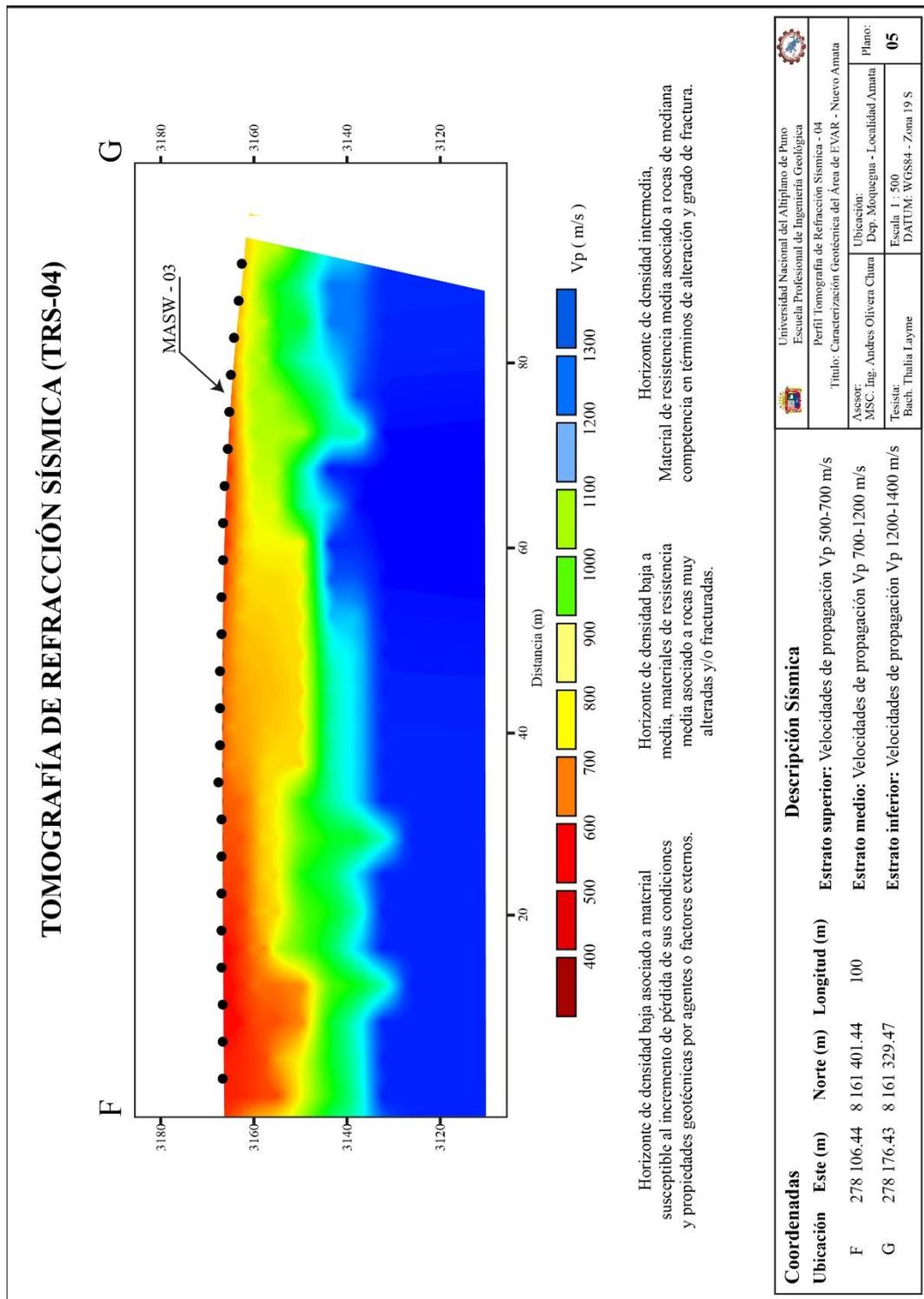
- El primer estrato presenta velocidad de ondas **P (Vp) entre 500 – 700 m/s**, describe un suelo ligeramente compacto con una profundidad variable de 1.07 y 10.10 metros. Dinámicamente se refiere a un horizonte de densidad baja asociado a material susceptible al incremento de pérdida de sus condiciones y propiedades geotécnicas por agentes o factores externos.
- El segundo estrato presenta velocidad de ondas **P (Vp) entre 700 – 1200 m/s**, describe un suelo medianamente compacto llegando alcanzar una profundidad que varía entre los 13.2 y 18.13 metros. Dinámicamente refiere a un horizonte de densidad baja a media, materiales de resistencia media asociado a rocas muy alteradas y/o fracturadas.
- El tercer estrato corresponde a velocidad de ondas **P (Vp) entre 1200 – 1320 m/s**, describe un material compacto el cual según su ubicación estaría por debajo de los 18 metros hasta alcanzar los 30 metros de profundidad de investigación. Dinámicamente se trataría de un horizonte de densidad intermedia, material de resistencia media asociada a rocas de mediana competencia en términos de alteración y grado de fracturación. La sección interpretada a la línea sísmica 03 y 04 se exponen a continuación.

Figura 68.
Perfil Línea Sísmica – 03



Nota. Perfil tomográfico de Refracción Sísmica para el área de estudio Nuevo Amata. Elaboración Propia.

Figura 69.
Perfil Línea Sismica – 04



Nota. Perfil tomográfico de Refracción Sísmica para el área de estudio Nuevo Amata. Elaboración Propia.

5.1.3 Perfil Eléctrico

El producto final de la aplicación del método TRE es la variación subsuperficial de la resistividad eléctrica (ρ) en formato 2D, para ello se presentan los perfiles de tomografía eléctrica, donde se analizan los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico.

5.1.3.1 Perfil TRE – 01

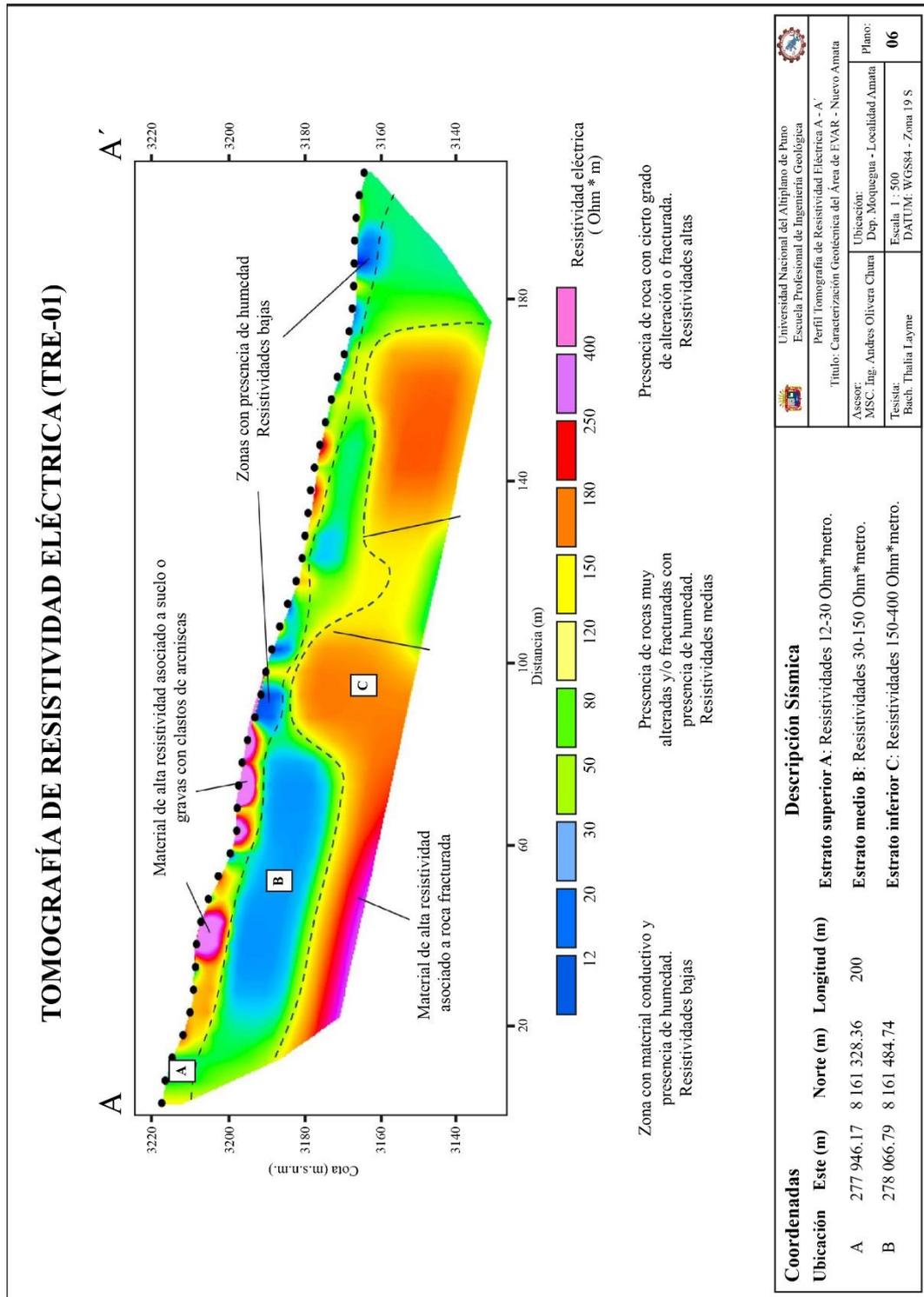
El perfil se ha trazado en dirección SW - NE con una longitud de 200 metros sobre la superficie del terreno, tal como se muestra el plano de exploración en planta, el perfil TRE – 01 se muestra a escala 1/500 (Figura 70). En este perfil tomográfico A – A' se identificaron principalmente tres estratos según la resistividad registrada para cada material.

- El primer estrato (**A**) según su litología geo resistiva estaría conformado por suelo cobertor, conformado por suelos orgánicos, arenas, limos y arcillas con fragmentos de rocas (depósito coluvial), con bajos valores de resistividad que varían, desde 12 – 30 ohm*m, con espesor menor a 10 metros de profundidad.
- El segundo estrato (**B**) estaría conformado por rocas muy alteradas y/o fracturadas con presencia de humedad (lutitas en capas delgadas), de valores resistividad que varían desde 30 – 150 ohm*m, con espesores que varían de los 10 a 25 metros de profundidad.
- El tercer estrato (**C**) estaría conformado por rocas con cierto grado de alteración o fracturación (areniscas cuarzosas), de mayores valores de resistividad que varían desde 150 – 400 ohm*m, con espesores mayor a 30 metros en profundidad.



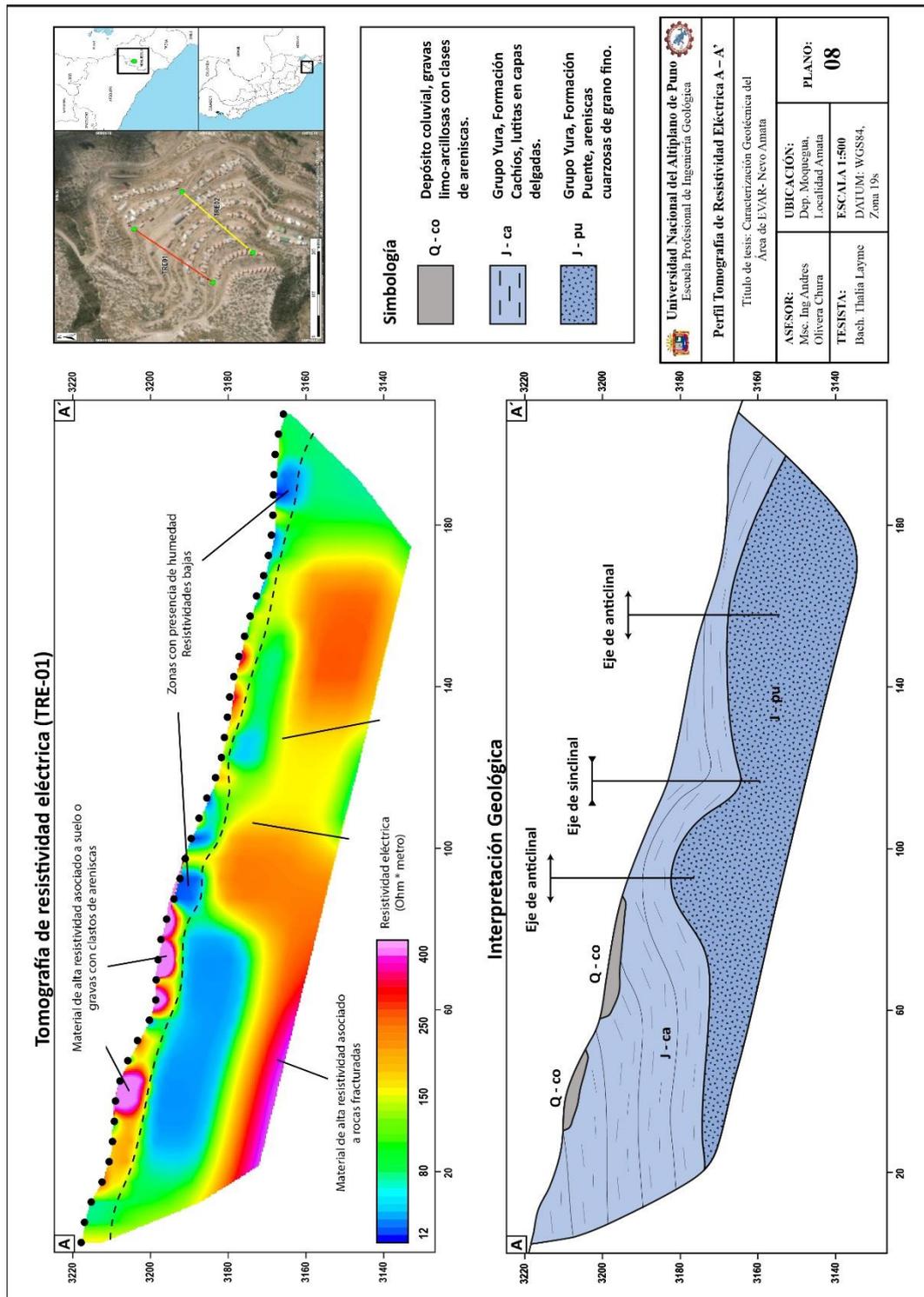
Por otra parte, se encontraron anomalías de alta resistividad en la escala de color **violeta y naranja** ubicadas entre la progresiva longitudinal 20 – 100m cercanas a la superficie, que posiblemente se trate de gravas con clastos de areniscas, y parte de la escala de colores **azulados** indican anomalías provocadas por la humedad o la presencia de sedimentos finos. Para contrastar el análisis estratigráfico se realizó la interpretación geológica del perfil con base en la geología local de Nuevo Amata como se observa en la figura 71.

Figura 70.
Perfil Resistividad Eléctrica – 01



Nota. Perfil Tomográfico de Resistividad Eléctrica para el área de estudio Nuevo Amata. Elaboración Propia.

Figura 71.
Perfil Resistividad Eléctrica 01 e Interpretación



Nota. Perfil Tomográfico de Resistividad Eléctrica e interpretación geológica para el área de estudio Nuevo Amata. Elaboración Propia

5.1.3.2 Perfil TRE – 02

El perfil se ha trazado paralelo a la línea TRE-01 con el mismo sentido de orientación SW – NE de una longitud de 200 metros sobre la superficie como se muestra el plano de exploración en planta y el perfil la TRE-02 a escala 1/500 (Figura 72). En el perfil tomográfico B – B' se identificaron principalmente tres estratos según la resistividad registrada para cada material.

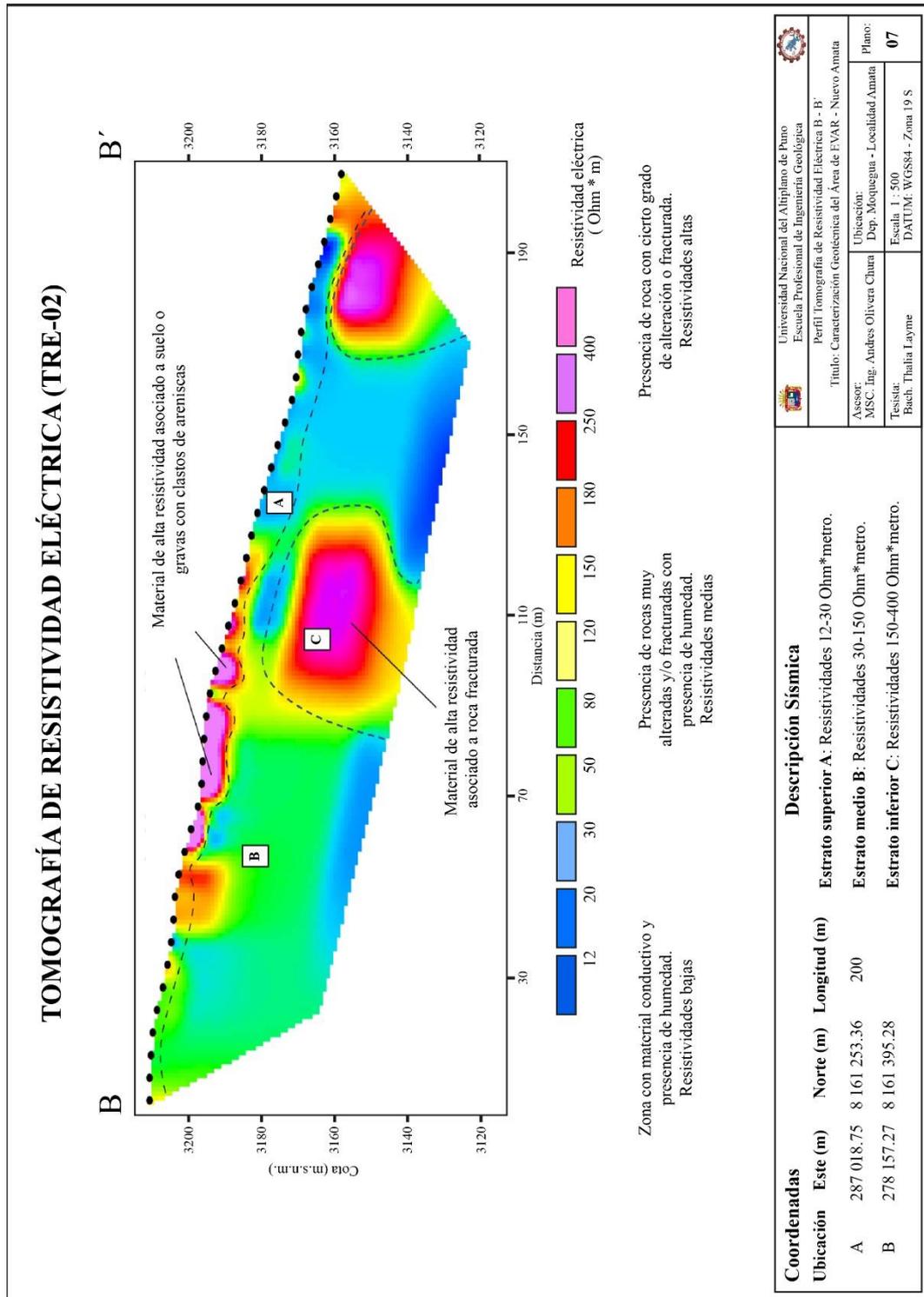
- El primer estrato (**A**) según su litología geo resistiva estaría conformado por suelo cobertor, conformado por suelos orgánicos, arenas, limos y arcillas con fragmentos de rocas (depósito coluvial). De valores bajos de resistividad que varían desde 12 – 30 ohm*m, con espesor menor a 10 metros de profundidad.
- El segundo estrato (**B**) estaría conformado probablemente por rocas muy alteradas y/o fracturadas con humedad (lutitas en capas delgadas), y valores de resistividad que varían desde 30 – 150 ohm*m, con espesores que varían de los 10 a 25 metros de profundidad.
- El tercer estrato (**C**) estaría conformado por rocas con cierto grado de alteración o fracturación (areniscas cuarzosas), de mayores valores de resistividad que varían desde 150 – 400 ohm*m, con espesor mayor a 30 metros en profundidad.

Además, el perfil resalta anomalías de altas resistividades en la escala de colores **violeta y naranja**, ubicada entre las progresivas 70 – 110 m cercanas a la superficie que, probablemente trate de gravas con clastos de areniscas, y parte de la escala de colores **azulados** indican anomalías provocadas por la humedad o la presencia de sedimentos finos, mientras en las progresivas de 110 a 190 m muestra la gran diferencia de resistividades de los materiales provocada por un cambio litológico.



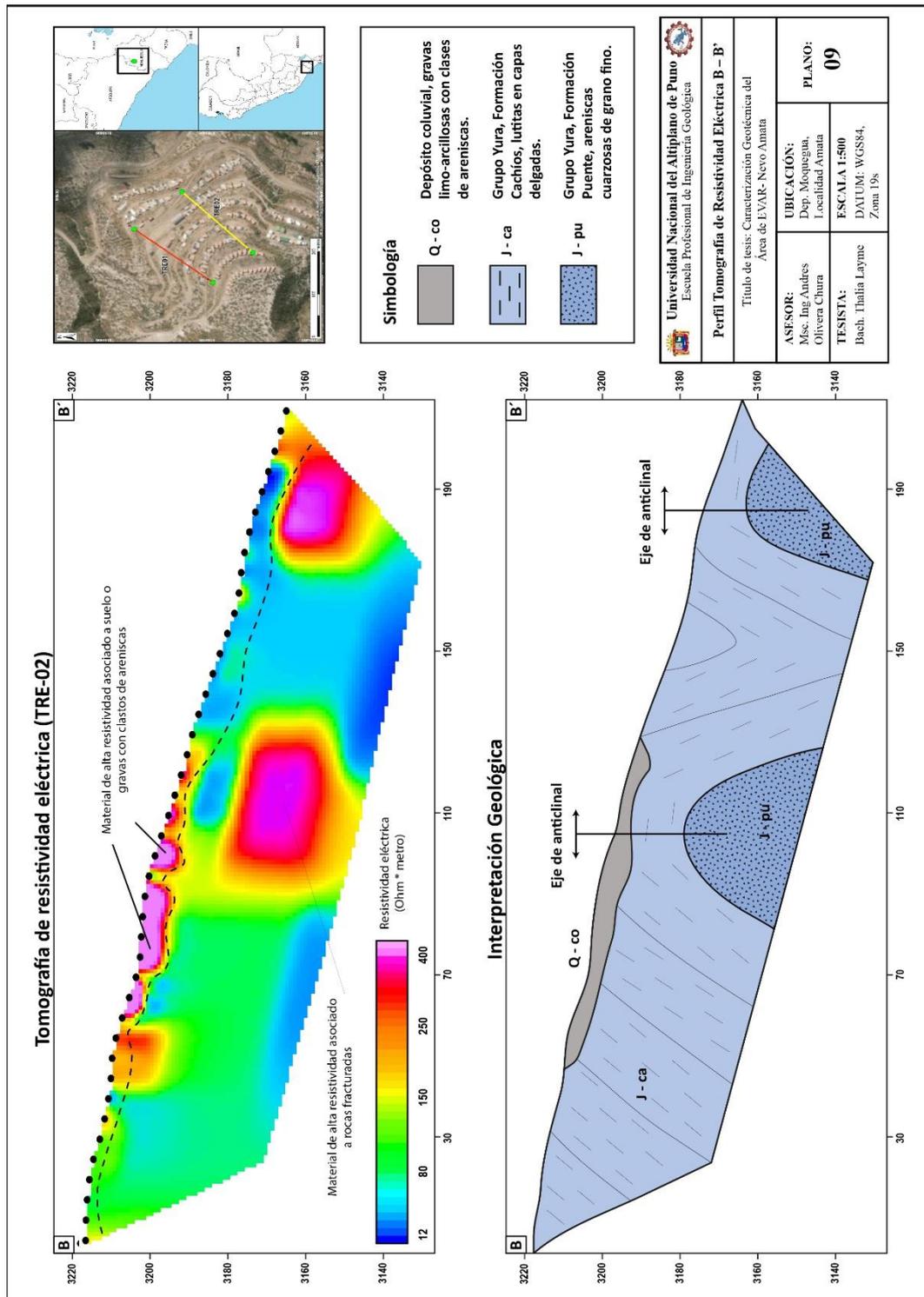
Para contrastar el análisis estratigráfico se realizó la interpretación geológica del perfil con base en la geología local de Nuevo Amata como se observa en la figura 73.

Figura 72.
Perfil Resistividad Eléctrica – 02



Nota. Perfil Tomográfico de Resistividad Eléctrica para el área de estudio Nuevo Amata. Elaboración Propia.

Figura 73.
Perfil Resistividad Eléctrica 02 e Interpretación



Nota. Perfil Tomográfico de Resistividad Eléctrica e interpretación geológica para el área de estudio Nuevo Amata. Elaboración Propia

5.2 Discusión

Los resultados del estudio permitieron obtener información particular de cada metodología aplicada, ya que estos brindan características propias de los materiales, es por ello que la correlación entre los datos geofísicos permitirá una interpretación notable. Empezamos por el análisis de peligro sísmico planteado en las normativas de diseño sísmico, con la finalidad de establecer la clasificación de suelo correspondiente al área de EVAR, Nuevo Amata.

5.2.1 Peligro Sísmico

5.2.1.1 Zonificación sísmica

1. El área de investigación según su ubicación en la norma Peruana E.030 pertenece a la zona sísmica número 3, de factor de zona $Z = 0.35g$.
2. De acuerdo a la zonificación sísmica estadounidense UBC-97 la zona 3 corresponde a una aceleración máxima del suelo de $0.30g$.

5.2.1.2 Parámetros Sísmico

1. De acuerdo a la norma peruana E.030, el factor de amplificación de suelo es $S = 1.15$. De modo que los periodos de vibración de suelo son de la siguiente manera: Un periodo límite de la plataforma del espectro de aceleraciones $T_p = 0.6$ seg y un periodo inicial de desplazamiento constante $T_L = 2.0$ seg.
2. Según el mapa de riesgo sísmico por IBC-ASCE 7, las aceleraciones espectrales o parámetros de respuesta espectral para las estructuras de periodo corto son $S_S = 1.50g$ y para estructuras de periodos largos $S_1 = 0.60g$ respectivamente. Los coeficientes de sitio para periodos son los siguientes: Periodos cortos, $F_a = 1.0$ y Periodos largos, $F_v = 1.7$.

5.2.1.3 Perfil de suelo

1. Con base a lo establecido en la norma E.030 y al estudio del proyecto, el área de EVAR clasifica como un tipo de suelo S2, perteneciente a suelos intermedios medianamente rígidos con velocidades de propagación de ondas de corte entre los 180 m/s y 500 m/s. Cuyo (V_{s30}) es 428m/s.

2. La norma americana IBC/ASCE 7, señala el equivalente de suelo intermedio peruano según sus propiedades físicas descritas como un suelo rígido tipo D, con velocidades de propagación de ondas de corte en los 30 m superiores desde la base de cimentación 180 m/s – 360 m/s. En nuestro caso de estudio resulta una clasificación de tipo de suelo C, perteneciente a suelo muy denso y/o roca suave blanda con velocidades de propagación de 360 – 760 m/s, cuyo (V_{s30}) es 428m/s.

5.2.1 Parámetros elásticos

En el presente estudio los parámetros elásticos fueron calculados en las posiciones donde se efectuó en forma simultánea los ensayos de Sísmica de Refracción y MASW, correspondiente a las líneas geofísicas de ambos ensayos sísmicos, los resultados se aprecian en las siguientes tablas: (32, 33, 34, 35) englobados por cantidad de estratos de acuerdo a la velocidad de ondas P.

Tabla 32.
Resumen, parámetros elásticos de los perfiles LS – 01 y MASW – 01

Estrato	Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m ³)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte (Kg/cm ²)	Módulo de Young (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm ²)
1°	1.07	581	249	1.8	0.35	1156.9	3120.2	3433.5
2°	3.71	710	340	1.8	0.31	2165.5	5653.9	4843.2
	5.28	804	336	1.8	0.36	2117.1	5743.0	6662.7
	15.58	1158	446	1.9	0.38	3803.8	10497.3	14562.2
3°	18.13	1204	463	1.9	0.38	4104.0	11329.2	15769.4
	30.00	1240	491	1.9	0.37	4606.0	12646.1	16568.4

Tabla 33.
Resumen, parámetros elásticos de los perfiles LS – 02 y MASW – 02

Estrato	Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m ³)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte (Kg/cm ²)	Módulo de Young (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm ²)
1°	1.07	526	238	1.8	0.33	1041.9	2771.5	2717.1
	10.96	680	473	1.9	0.02	4299.5	8790.5	3066.7
2°	13.19	701	478	1.9	0.05	4402.9	9223.7	3397.0
	15.58	1048	471	1.9	0.33	4264.9	11361.3	11268.2
3°	18.13	1204	510	1.9	0.35	5044.3	13643.7	15405.5
	20.85	1358	546	1.9	0.37	5837.5	15972.3	20181.0
	30.00	1441	584	1.9	0.37	6678.3	18242.5	22657.9

Tabla 34.
Resumen, parámetros elásticos de los perfiles LS – 03 y MASW – 03

Estrato	Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m ³)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte (Kg/cm ²)	Módulo de Young (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm ²)
1°	1.07	691	174	1.8	0.45	563.3	1634.7	5563.3
2°	2.31	723	183	1.8	0.45	626.0	1815.8	6098.1
	13.19	1158	536	1.9	0.32	5462.5	14425.8	13390.6
	15.58	1158	562	1.9	0.30	6029.0	15677.9	13078.8
3°	18.13	1204	576	1.9	0.31	6340.7	16569.6	14280.1
	20.85	1234	582	1.9	0.31	6484.7	17021.4	15123.8
	30.00	1240	601	1.9	0.30	6915.0	17986.5	15029.1

Tabla 35.
Resumen, parámetros elásticos de los perfiles LS – 04 y MASW – 04

Estrato	Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m ³)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte (Kg/cm ²)	Módulo de Young (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm ²)
1°	1.07	513	260	1.8	0.28	1256.5	3215.7	2431.8
	10.96	698	429	1.9	0.15	3484.4	8020.8	3829.9
2°	13.19	715	475	1.9	0.07	4297.9	9239.5	3622.3
	15.58	1148	506	1.9	0.34	4896.0	13108.1	13539.4
3°	18.13	1270	516	1.9	0.37	5097.4	13915.9	17181.8
	20.85	1297	519	1.9	0.37	5146.9	14100.6	18052.6
	30.00	1320	510	1.9	0.38	4969.7	13709.2	18925.2

A continuación, se realiza la interpretación de los parámetros de acuerdo a la estimación de estratos, que servirá como referente en los cambios numéricos observados. Las tres capas mencionadas en los perfiles sísmicos servirán de referente para el siguiente análisis:



- Las densidades del suelo aumentan con la profundidad del suelo, mostrando que las capas más profundas consisten en suelo altamente compactado, esto explica que, la densidad aparente en lo general aumenta con la profundidad debido al menor contenido de materia orgánica y la sobrecarga de las capas superiores.
- La relación de Poisson de la primera, segunda y tercera capa varía, aunque la tendencia no sea uniforme, la relación de Poisson siguió disminuyendo con la profundidad, ya que la capa superior sufre mayor deformación en comparación con las capas más profundas.
- En contraste con la relación de Poisson, el módulo de Young siguió aumentando con la profundidad. La tercera capa delineó los valores más altos del módulo de Young, lo que indica que se requieren altas cargas para deformarla.
- Los valores del módulo de corte obtenidos para la tercera capa indica materiales más rígidos en comparación con las dos capas superiores, ya que el valor del módulo de corte es mayor. Por lo tanto, se requiere una cantidad de fuerza para deformar la capa a lo largo del plano de la dirección de la fuerza.
- Similar al módulo de Young, el módulo de volumen también aumenta con la profundidad, los valores del módulo volumétrico de la tercera capa muestran los valores más altos, lo que indica que la capa es menos comprimible y requiere alta presión para cambiar su volumen.

El área de estudio Nuevo Amata, según la información obtenida se trataría de rocas sedimentarias, que la hace medianamente adecuada para la construcción de cimientos, ya que a mayor compactación eleva las capacidades de carga máximas y permisibles de la tercera capa a valores muy altos.



5.2.2 Estratigrafía

La validación de datos posterior a la interpretación de las metodologías aplicadas se plantea la presencia de tres estratos, que desde el punto de vista sísmico engloba a dos capas principales. Geológicamente refiere el estrato superior (**depósitos cuaternarios**) relacionado a depósitos de Lapilli, depósitos coluviales y la inferior (**depósitos sedimentarios**) del jurásico medio con una secuencia estratificada de lutitas verdosas y areniscas blanquecinas de grano fino.

Tomando como referencia la descripción anterior nos permite afirmar que el material obtenido en el área de estudio a partir del ensayo **Sísmica de Refracción**, trata de tres estratos: En superficie el primero, un horizonte de densidad baja (material cuaternario) de velocidad (V_p) 500 – 700 m/s con una profundidad variable de 3.7 a 13.19 metros. El segundo describe un horizonte de densidad baja a media (rocas muy alteradas) de velocidades (V_p) 700 – 1200 m/s con profundidad variable de 5.3 a 18.13 metros. El tercero describe un horizonte de densidad media (depósito rocoso de mediana resistencia) con velocidades (V_p) 1200 – 1441 m/s ubicado por debajo de los 18 metros hasta alcanzar los 30 metros de profundidad investigada

El ensayo **MASW** realizado en puntos de sondeo también diferencia tres estratos agrupando en dos principales de acuerdo al rango de velocidad presente: En superficie el primero, un suelo rígido (material cuaternario) de velocidad (V_s) 173.75 – 437 m/s llegando alcanzar una profundidad de 8.9 metros. El segundo trataría de un suelo muy denso y/o roca suave (depósitos de suelos y roca sedimentaria) de velocidad (V_s) 370.50 – 575.5 m/s llega alcanzar una profundidad de 18.13 metros.



El tercero al igual que el segundo el segundo trataría de un suelo muy denso y/o roca suave de velocidad (V_s) 474.0 – 601.0 m/s ubicado por debajo de los 18.13 llega alcanzar los 30.00 metros de profundidad, de resistencia media asociada a rocas de mediana competencia en términos de alteración y grado de fracturación.

Por su lado el ensayo de **Tomografía de Resistividad Eléctrica** diferencia la distribución longitudinal de tres estratos geoelectrónicos a gran detalle: En superficie el primero, (A) conformado por suelo cobertor con bajos valores de resistividad que varían, desde 12 – 30 $\text{ohm} \cdot \text{m}$, espesor menor a 10 metros de profundidad. El segundo (B) conformado por rocas muy alteradas y/o fracturadas con presencia de humedad, de valores resistividad que varían desde 30 – 150 $\text{ohm} \cdot \text{m}$, con espesores que varían de los 10 a 25 metros de profundidad. El tercero (C) conformado por rocas con cierto grado de alteración y/o fracturación, de mayores valores de resistividad que varían desde 150 – 400 $\text{ohm} \cdot \text{m}$, con espesores mayor a 30 metros en profundidad.



VI. CONCLUSIONES

El valor promedio de la velocidad de propagación de ondas de corte (V_{s30}) para el área de EVAR es 428 m/s. Según la norma técnica peruana de Diseño Sismorresistente (E.030, 2018) se concluye que, el área explorada clasifica como un suelo S2 (Suelos intermedios medianamente rígidos); de acuerdo con la norma americana International Building Code (IBC, 2018) predomina un suelo tipo C (Suelo muy denso y/o roca suave).

Los valores de velocidad de onda se encuentran en el rango de (V_p) 500 – 1441 m/s, (V_s) 174 – 601 m/s, dando como resultado los módulos de elasticidad de los estratos del subsuelo del área de EVAR: Módulo de Corte 563.3 – 6915.0 Kg/cm², Módulo de Young 1634.7 – 18242.5 Kg/cm², Módulo Volumétrico 2431.8 – 22657.9 Kg/cm², Densidad aparente 1.8 – 1.9 Tn/m³, Relación de poisson μ 0.28 – 0.38.

La determinación del basamento rocoso a partir de la de velocidades de propagación ondas obtenido en los perfiles sísmicos indicó que: El perfil unidimensional MASW, presenta valores de velocidad de onda (V_s) máximo de 601.0 m/s, relacionado a roca blanda a partir de los 18.13 metros de profundidad en adelante. El perfil de Refracción Sísmica, presenta velocidad (V_p) máximo de 1441 m/s, relacionado a rocas blandas (depósito de roca sedimentaria) a partir de los 18 metros de profundidad en adelante. Concluyendo así en la ausencia de una base rocosa de características que supere la (V_p) de 2000 m/s.

La resistividad de los materiales se identificó en un rango de registro según los estratos: En superficie el estrato superior A (resistividades 12 – 30 Ohm*metro), estrato medio B (resistividades 30 – 150 Ohm*metro), estrato inferior C (resistividad 150 – 400 Ohm*metro). También se identificaron anomalías de pequeñas zonas con alta resistividad en superficie y estarían asociados a suelo o gravas con clastos de arenas, además se observa el contraste de zonas con baja resistividad indicando la humedad en las capas de lutitas. Mientras que las zonas de muy alta resistividad a profundidad se relacionan con areniscas cuarzosas de grano fino.



VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda tomar en cuenta la caracterización del subsuelo para futuros estudios geotécnicos en el área de EVAR, Nuevo Amata, que requiera de la base del reconocimiento de campo previa ubicación de sondajes y ensayos directos.

Se recomienda realizar ensayos directos en el lugar de estudio para la medición de la densidad de los materiales, prueba de penetración estándar SPT, prueba de penetración de cono CPT, que contrasten los parámetros dinámicos obtenidos, ya que son recomendados en la precisión insitu de una investigación geotécnica.

Se recomienda la aplicación del método de Análisis de Microtrépidaciones en Arreglo Multicanal (MAM) con medio de apoyo del ruido ambiental, para obtener perfiles de velocidades de ondas de corte que permitan alcanzar profundidades de hasta 50 – 70 metros en la investigación del basamento rocoso. La obtención de un mejor detalle de la distribución lateral de las velocidades de ondas de corte (V_s) se recomienda aplicar el método MASW 2D como versión mejorada, ya que este también servirá para conocer el límite suelo/roca madre en una vista bidimensional.

De las anomalías detectadas en los perfiles del subsuelo según su litología georresistiva cambiante, se recomienda tomar en cuenta aquellas de baja resistividad que oscilan en el rango de 5 – 20 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ ya que por su naturaleza geológica es posible identificar el grado de saturación. Esta información es de suma importancia, debido a los antecedentes hidrogeológicos que podrían asociarse a la acumulación de agua en épocas de alta precipitación y generar asentamientos con el tiempo o licuación de suelos frente a sismos.



VIII. REFERENCIAS

- American Society of Civil Engineers. (2017). Minimum design loads for buildings and other structures. | ASCE standard, ASCE/ SEI 7-16 (7.a ed.).
- American Society of Testing Materials. (1994). Standard test methods for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio for advanced ceramics by impulse excitation of vibration", Standard C1259-94, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.02.
- American Society of Testing Materials. Standard D5777. (2011). Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation." ASTM International, West Consohocken, PA.
- American Society of Testing Materials. Standard D6431 (2018). Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Site Characterization. Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/D6431.h>
- American Society of Testing Materials. Standard D6429. (2011). Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods. ASTM International, West Consohocken, PA.
- Arguedas, J. M. S. (2020). Caracterización geotécnica de suelos en la Finca Jaboncillos, Escazú: análisis geofísico, estabilidad de laderas y capacidad de carga admisible (Doctoral dissertation, Universidad de Costa Rica).
- Arias, P. M. C. (2019). Caracterización geotécnica de la formación Mangán, mediante métodos geofísicos (Doctoral dissertation, Universidad de Cuenca).
- Astier, J. L. (1975). *Geofísica aplicada a la hidrogeología* (Paraninfo).
- Atencio y Romero (2000). Memoria descriptiva de la geología del cuadrángulo de Puquina 34-t [Escala 1:50 000]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2048>
- Avila, S. (2016). *¿Cómo evitar los daños durante una construcción? – Punto Edu PUCP*. <https://puntoedu.pucp.edu.pe/noticia/como-evitar-los-danos-durante-una-construccion/>
- Ayashi, K (2003). Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Wave Methods. Short Course - SAGEEP 2003.
- Benavente Escobar, C. L., & Rosado Seminario, M. (2011). Reactivación del deslizamiento de Amata. Distrito de Coalaque-Región Moquegua.
- Benson, RC, Yuhr, L. y Kaufmann, RD (2003, diciembre). Algunas consideraciones para la selección y aplicación exitosa de métodos geofísicos de superficie. En el 3er Congreso Internacional de Geofísica Aplicada, Hotel Royal Plaza, Orlando, Florida.
- Borja, M (2016). Metodología de Investigación Científica para Ingeniería Civil.



- Cantos, J., (1983) Tratado de geofísica aplicada. Ed. Ist. Geol. Y Minero de España, Madrid.
- Cárdenas, P. (2019). Caracterización geotécnica de la formación Mangán, mediante métodos geofísicos.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/33546/1/TrabajodeTitulacion.pdf>
- Carpio, J., & Peña, F. (2020). Hidrogeología de la cuenca del río Tambo 1318 regiones Arequipa, Moquegua y Puno - [Boletín H 7]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2573>
- Cercato, M., de Donno, G., di Giulio, A., Lanzo, G., & Tommasi, P. (2020). Dynamic characterization of the hill of Civita di Bagnoregio (Viterbo, Central Italy) for seismic response analysis. *Engineering Geology*, 266, 105463.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2019.105463>
- Choon B. Park, Richard D. Miller y Jianghai Xia, (1999). Análisis multicanal de ondas superficiales", *Geofísica* 64: 800-808.
- Choon B. Park, Richard D. Miller y Jianghai Xia, (1999). Análisis multicanal de ondas superficiales", *Geofísica* 64: 800-808.
- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. CISMID (1991). Memorias del Seminario Taller de Dinámica de Suelos. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Centro de Operaciones de Emergencia Nacional. COEN-INDECI. (2020). *Precipitaciones pluviales en el Departamento de Moquegua*. <https://n9.cl/oj82x>
- Cuno, L. (2021). Caracterización del subsuelo para la cimentación de estructuras usando métodos de prospección geofísica en los terrenos de la corte superior de justicia de Arequipa – Perú.
- Foti, S., Lai, C. G., Rix, G. J., & Strobbia, C. (2015). Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization.
- Graff, K.E. (1975). Wave motion in elastic solids. Oxford University Press, London.
<https://www.osso.org.co/docu/tesis/2001/comportamiento/Tesis-Cris-DocumentoFinal-13septiembre2001.pdf>
- Humire, F., Sáez, E., & Leyton, F. (2015). Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro Vs30 (1.a ed., Vol. 1). eopsy.
- ICC, INC. (2018). International Building Code (2018 ed.). Publications, 4051 Flossmoor Road, Country Club Hills, IL 60478. <https://www.iccsafe.org/codebonus>.
- Iakubovskii, I. U. V., & Liajov, L. L. (1980). Exploración Eléctrica: Editorial Reverté. Barcelona, España.
- Keller, G. V., & Frischknecht, F. C. (1996). Electrical Methods in Geographical Prospecting.



- Knodel, K., Lange, G., & Voigt, H. J. (2007). Environmental Geology. Handbook of field methods and case studies. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-74671-3>
- Lankston, R. W. (1848). High Resolution Refraction Data Acquisition and Interpretation, Geo-Compu-Graph, Inc., U.S.A. <https://geometrics.com/wp-content/uploads/2018/10/S-TR102.pdf>
- Loke M. H. (2004). Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys.
- Loke, H., López, A., Fanton, O., y Cara E. (2002). Técnicas prácticas para investigación de resistividad en 2D y 3D. Geotomo Software. Malasia
- Luque, G., Pari, W., Dueñas, K., & Huamán, M. (2020). Peligro geológico en la región Moquegua - [Boletín C 75]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET*.
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2565>
- Manilla, A. (2003). Geofísica aplicada en los proyectos Básicos de Ingeniería Civil. Publicación Técnica, (229).
- Martínez, P., & Azuaga, M. (1997). Medición del módulo de elasticidad de Young: Apuntes laboratorio IV.
- McMechan, G., & Yedlin, M.J. (1981). Analysis of dispersive waves by wave field transformation, *Geophysics*, v. 46, n. 6, p. 869-874.
- Miller, G. F., & Pursey, H. (1954). The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of semi-infinite isotropic solid: *Proc. Roy. Soc.*, 223.
- Miller, R. D., Pullan, S.E., Waldner, J. S., Haeni, F. P. (1986). Field comparison of shallow seismic sources, *Geophysics*, Vol. 51, N° 11, Pag. 2067 – 2092, U.S.A. Orellana, E., (1982), *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Paraninfo, Madrid.
- Miller, R.D., Xia, J., Park, C.B., Ivanov, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock: *Leading Edge*, 18, 1392-1396.
- Molina, G. A. R., Rinaldi, V. A., & Taborda, R. (2004). Tomografía Geoelectrica: Desarrollo y Potenciales Aplicaciones en Geotecnia. In XVII Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, SINERGIA.
- Montoya Colonna, V. V. (2019). Caracterización del Suelo e Identificación de Discontinuidades Estructurales de Deslizamientos mediante Tomografía Eléctrica 2D. El Alto, Pampas de Majes.



- Moya, A., Torres, J., & Contreras, M. (2020). Caracterización de Sitio empleando Prospección Geofísica y Geotécnica. Caso de estudio Vía principal Troncal Central del Norte (Ruta Nacional 55) a la altura del Km 68+500 en el Municipio de Pamplona, Norte de Santander (Colombia). *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 48, 30–45.
<https://doi.org/10.15446/rbct.n48.85411>
- Parasnis, D. S. (1970). *Principios de Geofísica aplicada*. – 205 págs. Ed. Paraninfo, Madrid.
- Parasnis, D. S. (1997). *Principles of Applied Geophysics*. 5th Edition, Chapman and Hall, London, 104-176.
- Park, C, Miller, R. & Ma, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*. Vol. 64. NO 3. p: 800-808.
- Park, C., Miller, R., Xia, J., & Ivanov, J. (2001a). Seismic characterization of geotechnical Sites by Multichannel Analysis of Surfaces Waves (MASW) method. Tenth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering (SDEE), Philadelphia.
- Park, C.B. (2001). Seismic Characterization of Geotechnical Sites by Multichannel Analysis of 564 Surface Waves (MASW) Method.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., Hunter, J.A., and Harris, J. B. (1999a). Higher mode observation by the MASW method: Technical Program with Biographies, SEG, 69th Annual Meeting, Houston, TX, 524-527.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999b). Multi-channel analysis of surface waves (MASW) *Geophysics*, 64, 800 – 808.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999c). Multimodal analysis of high frequency surface wave. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 99)*, Oakland, CA, March 14-18, p. 115-122.
- Park., C.B., R. D. Miller, and J. Xia, Julian M. (1999). *Multichannel Analysis of Surface Waves to Map Bedrock*, Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, U.S.
- Peralta, S.A. (2007). Levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en el área de El Mamón, al norte del poblado de Urumaco, Estado de Falcón. - 111 págs. Univ. Simón Bolívar Sartenejas.
- Palacky, G., & West, G. (1987). *Métodos electromagnéticos en geofísica aplicada*. Características de resistividad de los objetivos geológicos, 52-129.
- Perdomo S. (2009). Tomografía Eléctrica en Apoyo de la investigación Arqueológica. *Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de la Plata*. 4 – 18 p.
<https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26461>



- Quispesivana, L., & Zapata, A. (2000). Memoria descriptiva de la geología del cuadrángulo de Omate (34-u) [Escala 1:50 000]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2045>
- Ramírez, N. (2010). Caracterización de Fallas y Fracturas Mediante Tomografía Eléctrica Utilizando Electrodo de Acoplamiento Capacitivo. *Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México*. 33 – 38 p.
- Rayleigh, L. (1885). On waves propagated along the plane surface of an elastic solid: Proc. Lond. Math. Soc., 17, 4.
- Redpath B., B. (1973). Seismic Refraction Exploration for Engineering Site, Investigations, Explosive Excavation Research Laboratory Livermore, California, U.S.A.
- Rodríguez, M. (2001). Geofísica Aplicada a la Obra Civil. Método Geoeléctrico y Sísmica de Refracción. Casos Prácticos. *Geoconsult Ingenieros Consultores, Valencia, España*. <http://www.geoconsult.es/>
- Rosales Climent, Cristina (2001). Comportamiento Sísmico de los Depósitos de Suelos del Área del Cañaveralejo, Cali, Colombia, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Sahadewa, A., Zekkos, D., and Woods, R. D. (2012). Observations from the Implementation of a Combined Active and Passive Surface Wave Based Methodology.” Proc. State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering (Geocongress, 2012), 2786-2795.
- SENCICO & Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). Norma E.030 Diseño sismorresistente.pdf. Norma E.030 Diseño Sismorresistente Reglamento Nacional de Edificaciones, 2020. <https://drive.google.com/file/d/1W14N6JldWPN8wUZSqWZnUphg6C559bi-/view>
- Sheriff, R. E. (1991). Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (376 p). Society of Exploration Geophysicists. Tulsa, Okla.
- Sheriff, R. E. (2002). Encyclopedic dictionary of applied geophysics: SEG Geophysical Reference Series No. 13, 4th Ed., *Society of Exploration Geophysicists (SEG)*, Tulsa, Oklahoma, 429 pp.
- Sheriff, R.E., y Geldart, L.P. (1982). Sismología de exploración, procesamiento de datos e interpretación: Cambridge Univ. Press.
- Singh, V., Kumar, Ap., Rao, M., & Sambasiva Rao, G. (2017). Geotechnical Site Characterization Using Surface Waves. *VFSTR Journal of STEM*, 03(01), 2455–2062. <http://dx.doi.org/xx.xxx/xxx.xxx.xxx>
- Soncco & Vela (2019). *Evaluación de peligros geológicos de la zona propuesta para reubicación en el sector de Amata. Región Moquegua, provincia General Sánchez Cerro, distrito Coalaque*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2335>



- Suzuki, H, y Hayashi, K. (2003). Shallow s-wave velocity sounding using the Microtremors array measurements and the surface wave method; Proceedings of the SAGEEP 2003, San Antonio, Texas, SUR08, Proceedings on CD ROM.
- Tavera & Bernal (2020). Estudio geofísico de los acantilados de la Costa Verde en el Distrito de Magdalena del Mar.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., & Keys, D.A. (1976). Applied Geophysics, Cambridge Univ. Press.
- Telford, W.M., Telford, W.M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). Geofísica aplicada. Prensa universitaria de Cambridge.
- Villilli, N. (2018). Caracterización geotécnica de los suelos del volcánico Sencca, mediante refracción sísmica y análisis de ondas superficiales (masw), en el A.A.H.H. Villa Florida del Distrito de Yura – Arequipa. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6297>
- Xia, J., Miller R.D., and Park, C.B. (1998). Construction of vertical section of near-surface shear-wave velocity from ground roll: Technical Program, The Society of Exploration Geophysicists and The Chinese Petroleum Society Beijing 98' International Conference.
- Xia, J., Miller, R.D., & Park, C.B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves: Geophysics, v. 64, n. 3, p. 691-700.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B. (1999a). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave: Geophysics, 64, 691 700.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Hunter, J.A., and Harris, J.B. (1999b). Evaluation of the MASW technique in unconsolidated sediments: Technical Program with Biographies, SEG, 69th Annual Meeting, Houston, TX, 437-440.
- Xia, J., R.D. Miller & C.B. Park. (2000a). Ventajas de calcular la velocidad de la onda de cizallamiento a partir de ondas superficiales con modos más altos: [Exp. Abs.]: Soc. Expl. Geophys., p.1295-1298.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., e Ivanov, J. (2000b). Construction of 2-D vertical shear-wave velocity field by the Multichannel Analysis of Surface Wave technique, Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2000), Washington D.C, 20-24 de febrero, p. 1197-1206.

ANEXOS

Anexo. Registro Fotográfico.



Ambiente de investigación Nuevo Amata, vista SW
Fuente, Autor 2020



Reconocimiento del área de trabajo, vista SE
Fuente, Autor 2020



Montaje de la línea Sísmica
Fuente, Autor 2020



Plantado de geófonos
Fuente, Autor 2020



Control de conexión estable de conectores
Fuente, Autor 2020



Instalación de Equipo Sísmico
Fuente, Autor 2020



Toma de medidas de las líneas de prospección
Fuente, Autor 2020



Plantado de electrodos, vista NE
Fuente, Autor 2020



Adquisición de data Sísmica
Fuente, Autor 2020



Registro de coordenadas
Fuente, Autor 2020



Adquisición de data Sísmica
Fuente, Autor 2020



Adquisición de data eléctrica.
Fuente, Autor 2020