



DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS Y CAPACIDAD PORTANTE DE LOS
SUELOS USANDO TÉCNICAS DE EXPLORACIÓN SÍSMICA. CASO DE ESTUDIO:
URBANIZACIÓN VALLE DEL ESPÍRITU SANTO, PAMPLONA, COLOMBIA.

Autor

JOSE JAIRO HERAZO ALVAREZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

2020

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS Y CAPACIDAD PORTANTE DE LOS
SUELOS USANDO TÉCNICAS DE EXPLORACIÓN SÍSMICA. CASO DE ESTUDIO:
URBANIZACIÓN VALLE DEL ESPÍRITU SANTO, PAMPLONA, COLOMBIA.

Autor

JOSE JAIRO HERAZO ALVAREZ

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
INGENIERO CIVIL

Director

JAIRO ALBERTO TORRES PEÑA

Físico

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

2020

RESUMEN

Esta investigación presenta la clasificación de los suelos mediante el parámetro V_{s30m} , basados en el “título A” de la norma NSR-10 (Ministerio de Ambiente, REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10 , 2010) y la determinación de otros parámetros como: el coeficiente de Poisson, el módulo de Young, el módulo de Rigidez y la capacidad portante de los suelos; partiendo de las velocidades sísmicas tipo P y S que se obtienen del procesamiento, mediante las técnicas de Tomografía de Refracción Sísmica (TRS) y el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), de los datos geofísicos previamente levantados en la urbanización Valle del Espíritu Santo, municipio de Pamplona, Colombia. La metodología del trabajo se desarrolla en cuatro (4) fases: recopilación de datos sísmicos y especificaciones de la zona de estudio; reprocesamiento de datos para obtención de velocidades sísmicas tipo P y S mediante las técnicas TRS y MASW; análisis e integración de información para determinar los parámetros dinámicos del suelo; obtención y correlación de parámetros geotécnicos para caracterización del suelo. Para el procesamiento de datos se usó el software SeisImager: “Pickwin” y “Plotrefa” para la tomografía de refracción sísmica (TRS) y se utilizaron “Surface Wave Analysis Wizard” y “WaveEq” para el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW).

Palabras clave: Geotecnia, TRS, MASW, sísmica, reprocesamiento.

ABSTRACT

This research presents the classification of soils using the parameter V_{s30m} , based on the "title A" of the NSR-10 standard (Ministerio de Ambiente, REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10 , 2010) and the determination of other parameters such as : Poisson's ratio, Young's modulus, Rigidity modulus and bearing capacity of soils; Starting from the P and S type seismic velocities obtained from the processing, using the techniques of Seismic Refraction Tomography (TRS) and the Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), of the geophysical data previously collected in the Valle del Espíritu Santo urbanization , Municipality of Pamplona, Colombia. The work methodology is developed in four (4) phases: collection of seismic data and specifications of the study area; data reprocessing to obtain P and S type seismic velocities by means of TRS and MASW techniques; analysis and integration of information to determine the dynamic parameters of the soil; obtaining and correlation of geotechnical parameters for soil characterization. For data processing, the SeisImager software was used: "Pickwin" and "Plotrefa" for seismic refraction tomography (TRS) and "Surface Wave Analysis Wizard" and "WaveEq" were used for Multichannel Surface Wave Analysis (MASW).

Keywords: Geotechnics, TRS, MASW, seismic, reprocessing.

Contenido

INTRODUCCIÓN	9
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
JUSTIFICACION.....	11
OBJETIVOS.....	12
OBJETIVO GENERAL	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
MARCO CONTEXTUAL	13
Pamplona, Norte de Santander, Colombia.	13
Geología local	14
Zona de estudio	15
MARCO TEORICO.....	16
Método geofísico:.....	16
Métodos sísmicos:	16
MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves):	17
ESTADO DEL ARTE.....	18
LOCAL:	18
NACIONAL:	19
INTERNACIONAL:	20
MARCO LEGAL	23
METODOLOGÍA	24
Recopilación de datos sísmicos.....	24
Reprocesamiento.....	24
MASW	24
TRS.....	28
Análisis e integración de información.....	30

Obtención de parámetros dinámicos.	31
Obtención de las Velocidades sísmicas tipo P y S a partir de las técnicas TRS y MASW:.....	33
TRS:	33
MASW	37
Clasificación de los perfiles de suelo mediante la tabla A.2.4-1 del título A de la NSR-10:.....	40
CONCLUSIONES	42
RECOMENDACIONES	44
BIBLIOGRAFÍA.....	45

Ilustraciones:

Figura 1: Vista superior: Urbanización Valle del Espíritu Santo.....	10
Figura 2: Fallas estructurales:	10
Figura 3: Ubicación del sitio de estudio en el municipio de Pamplona.	13
Figura 4: Geología de la plancha 110 de Pamplona.....	14
Figura 5: Vista superior zona de estudio.....	15
Figura 6: Procesamiento MASW 1D: Tren de Ondas Superficiales.	25
Figura 7: Distribución de Fuentes y Sensores.....	25
Figura 8: Procesamiento MASW 1D: Curva de dispersión experimental.....	26
Figura 9: Curvas de dispersión - Modo fundamental de todos los disparos.	26
Figura 10: Procesamiento MASW 1D: Modelo teórico (inicial).	27
Figura 11: Procesamiento MASW 1D: Modelo final de velocidades aparentes reales.	27
Figura 12: Picados primeros arribos.....	28
Figura 13: Datos observados Vs Calculados.....	29
Figura 14: Modelo basado en la inversión de Mínimos Cuadrados.....	29
Figura 15: Modelo a partir de la inversión de la tomografía.....	30
Figura 16: TRS - Línea 1.....	33
Figura 17: TRS - Línea 2.....	34
Figura 18: TRS - Línea 3.....	35
Figura 19: TRS - Línea 4.....	36
Figura 20: MASW - Línea 1	37
Figura 21: MASW - Línea 2	38
Figura 22: MASW - Línea 3	39

Tablas

Tabla 1: Velocidad promedio a 30m del perfil y clasificación del suelo de la línea 1.....	30
Tabla 2: Velocidad promedio a 30m del perfil y clasificación del suelo de la línea 2.....	31
Tabla 3: Velocidad promedio a 30m del perfil y clasificación del suelo de la línea 3.....	31
Tabla 4: Parámetros dinámicos - Línea 1	32
Tabla 5: Parámetros dinámicos - Línea 2.....	32
Tabla 6: Parámetros dinámicos - Línea 3.....	32
Tabla 7: Clasificación del suelo - Línea 1	40
Tabla 8: Clasificación del suelo - Línea 2.....	40
Tabla 9: Clasificación del suelo - Línea 3.....	41

INTRODUCCIÓN

La geofísica en la ingeniería civil, especialmente en el campo geotécnico, es una herramienta que permite obtener un mejor desempeño al momento de identificar o clasificar los suelos, puesto que genera una estimación de los mismos a profundidades considerables sin tener que recurrir a la elaboración de apiques. La geofísica no llega como sustituto, sino como complemento a la geotecnia, pues esta permite ver las condiciones del suelo a grandes rasgos, pero no identifica minuciosamente los parámetros que se necesitan para dar contundencia a los diseños previos necesarios a una obra civil.

En este documento se muestra cómo, mediante técnicas de exploración sísmica y su debido procesamiento con el software “SeisImager”, se obtienen las velocidades de onda P y S para la determinación de los tipos de suelos y definición de los principales parámetros dinámicos del mismo; con el fin de dar soporte a futuros estudios geotécnicos a realizarse en el sitio de estudio.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El barrio “Valle del Espíritu Santo” ha sido objeto de estudio de muchas dependencias. Durante muchos años se han presentado eventos meteorológicos que trajeron como resultado la remoción de masas de tierra en el lugar, acabando incluso con viviendas situadas en el mismo. Estos actos han sido consecuentes a la falta de realización de estudios geotécnicos para conocer el comportamiento del suelo a nivel estructural en el sitio de estudio.



Figura 1: Vista superior: Urbanización Valle del Espíritu Santo.

Fuente: (Torres, 2012)



Figura 2: Fallas estructurales:

a. Grieta por cortante ángulo de falla de 45°; b. Grieta por flexión; c. Grietas por asentamiento diferencial significativo en la zona; d. Despasivación y corrosión del acero.

Fuente: (Pérez, 2019) [17].

JUSTIFICACION.

La presente investigación se enfocará en definir, mediante la geofísica, los parámetros dinámicos del suelo del sitio de estudio para conocer las características del mismo como complemento a la geotecnia; propiciando así la oportunidad de conocer la estructura del sitio de estudio y estimar su comportamiento frente a varios fenómenos meteorológicos. Considerando que en análisis previos se han obviado algunos parámetros, se cree importante establecer posibles avances para dar a conocer, a grandes rasgos, una vista general de la composición de la zona de trabajo, de tal manera que se logre asertividad en la realización de apiques para futuros estudios in situ.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar los parámetros dinámicos y la capacidad portante de los suelos mediante el uso de Tomografía de Refracción Sísmica (TRS) y el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) en el la Urbanización Valle del Espíritu Santo, en el municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Recopilar y revisar la información geofísica ya levantada en el área de estudio mediante las técnicas de TRS y MASW.
2. Obtener las velocidades sísmicas tipo P y tipo S a partir del procesamiento de los datos geofísicos mediante las técnicas de TRS y MASW.
3. Determinar el coeficiente de Poisson, el módulo de Young, el módulo de Rigidez y la capacidad portante de los suelos a partir de las velocidades sísmicas tipo P y S.
4. Correlacionar y clasificar los Suelos del área de estudio mediante el parámetro V_{s30m} a partir del título A de la NSR 10

MARCO CONTEXTUAL

Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

El municipio de Pamplona está situado en las coordenadas $72^{\circ}39'$ de longitud al oeste de Greenwich y a $7^{\circ}23'$ de latitud norte. Se encuentra situada a 2.200 metros sobre el nivel del mar, limita al Norte con Pamplonita y Cucutilla, al sur con los municipios de Cácuta y Mutiscua, al oriente con Labateca y al occidente con Cucutilla. Su extensión total es de 318 Km², pero su extensión en área urbana es de 59.214 Km² con 76.983 habitantes aproximadamente. Su extensión en área rural es de 1.176 Km². La altitud de la cabecera municipal es de 2.200 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura media de 16° C. [1]

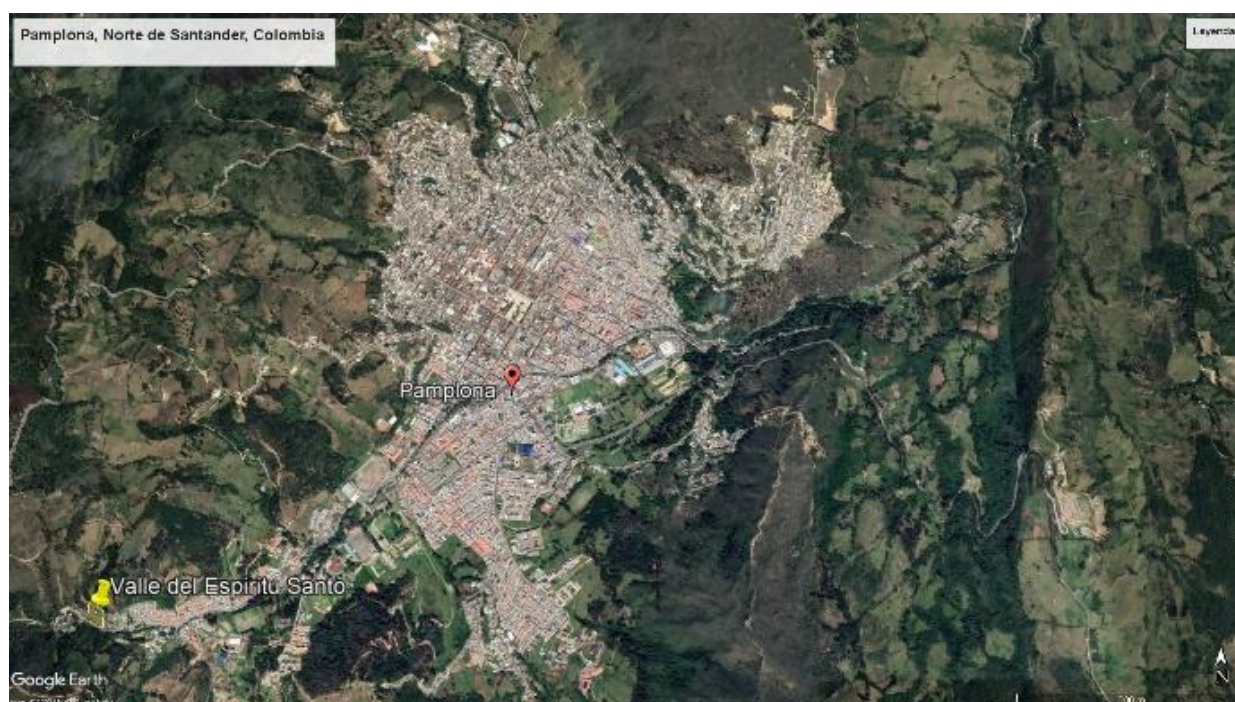


Figura 3: Ubicación del sitio de estudio en el municipio de Pamplona.

Fuente: Google Earth Pro 2019.

Geología local

En la zona se presentan fallas inversas menores que pone en contacto rocas del Complejo metamórfico con rocas Cretácicas y Rocas Jurásicas con rocas Cretácicas. (INGEOMINAS, 2011).

El registro estratigráfico del sector incluye rocas con edades que van desde el Predevónico hasta el Cuaternario, asociadas a procesos metamórficos, ígneos y sedimentarios. Estas rocas han sido afectadas por eventos de deformación tectónica que han dado lugar a diversos tipos de estructuras geológicas. (CHAPARRO, DUARTE; 2013).

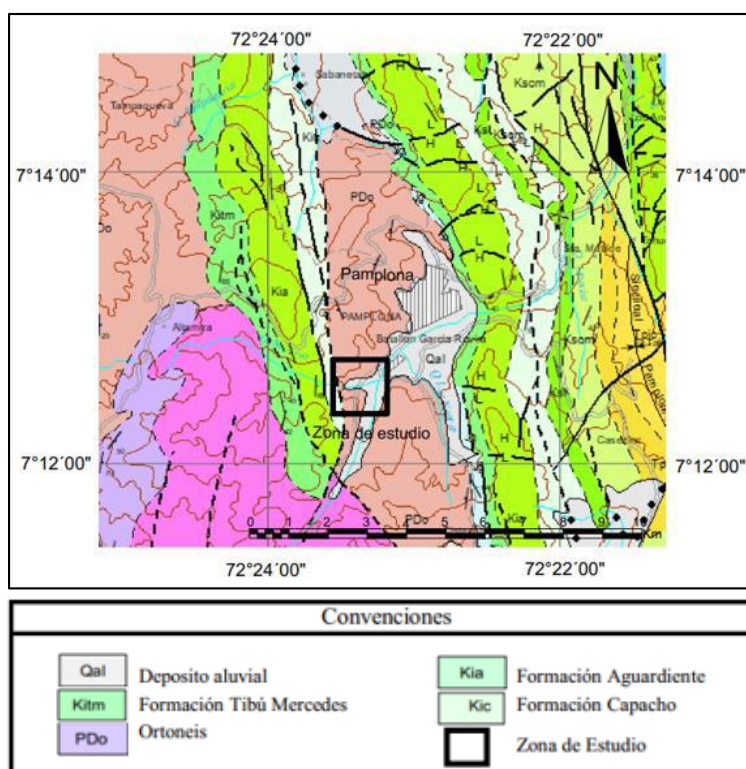


Figura 4: Geología de la plancha 110 de Pamplona.

Fuente: Ministerio de Minas y Energía (Servicio Geológico Colombiano).

Zona de estudio

En la Urbanización Valle del Espíritu Santo se establecieron líneas de estudio (figura 5) para hacer el respectivo análisis propuesto.

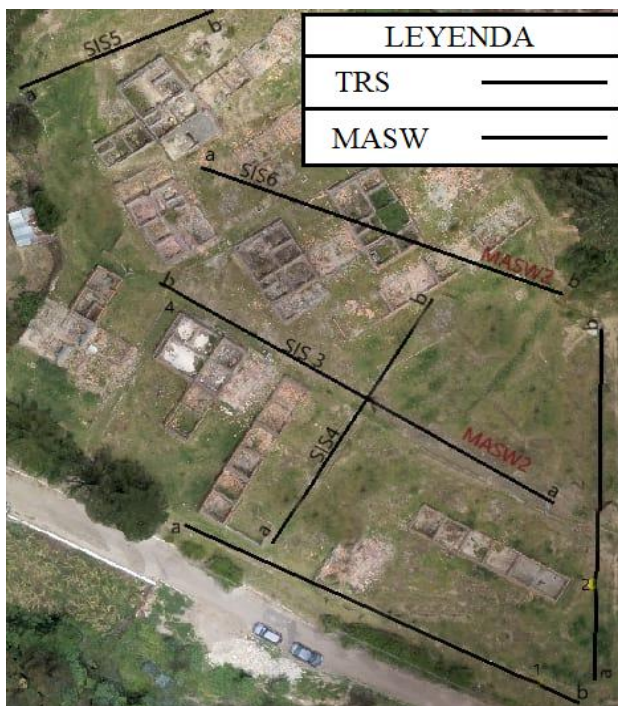


Figura 5: Vista superior zona de estudio.

Fuente: (TORRES, 2019)

MARCO TEORICO.

Método geofísico:

En las últimas décadas se ha hecho extensiva la utilización de métodos geofísicos para la caracterización de suelos mediante la obtención de parámetros dinámicos, pero antes de ello solo se conocían métodos mecánicos para poder identificar la estructura y comportamiento de los mismos bajo condiciones constructivas previamente planeadas o estipuladas. A inicios de la década de los 70 se empiezan a implementar métodos geofísicos, principalmente de tipo sísmico, para estudiar suelos; entre los cuales se encuentran: refracción sísmica, crosshole y downhole. En la década de 1980 se incorporó el uso de análisis de ondas de superficie al campo de la caracterización de suelos con la implementación de métodos como: SASW (Spectral Analysis of Surface Wave), MASW (Multi-channel Analysis of Surface Wave) y ReMi (Refraction Microtremor). Con estos métodos, hasta el día de hoy, se obtienen datos de ensayos como: Modulo de Young, Rigidez, Bulk, Elasticidad, coeficiente Poisson, capacidad admisible y asentamientos diferenciales. [2], [3], [4].

Métodos sísmicos:

Se han hecho estudios donde, evaluando el uso del análisis de ondas superficiales en sus variantes activa y pasiva, conjuntamente con la sísmica de refracción somera, permite determinar parámetros dinámicos a partir de las velocidades transversales y longitudinales obtenidas de los métodos sísmicos y los métodos de diagnóstico de suelos contaminados por sustancias peligrosas: invasivos (tradicionales) y no invasivos (geofísicos); también se puede obtener la curva de dispersión y el proceso de inversión de los datos para la obtención del perfil de velocidad de onda de corte, criterios que servirán para determinar el cálculo y evaluación de los parámetros elásticos

del suelo mediante análisis geológicos como complemento en la caracterización de suelos. [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12].

MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves):

El ensayo MASW es un método que interpreta las ondas generadas por una fuente de energía impulsiva en puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno, obteniéndose el perfil de velocidades de ondas de corte (V_s), hasta profundidades promedio de 25 m a 30 m, para el punto central de dicha línea. [13]. Este perfil se obtiene mediante la inversión de las curvas de dispersión del modo fundamental de las ondas superficiales tipo Rayleigh cuando estas se transforman en el dominio de la frecuencia y la velocidad de fase. [14]. La medición de la velocidad de la onda de corte es beneficiosa para analizar las variaciones en la rigidez del subsuelo. [15].

TRS (Tomografía de Refracción Sísmica)

La técnica por Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), estudia la respuesta del terreno cuando se propaga a través de una onda de compresión producida por medios mecánicos en la superficie. El parámetro que se analiza es el de la Velocidad de propagación de la onda a través de los materiales del subsuelo en función de la compacidad de los mismos. [24]

Mediante la norma ASTM en su numeral D5777, nos permite conocer el tipo de suelo mediante la variación de las velocidades de onda P (V_p) arrojadas luego del procesamiento en diferentes softwares especializados.

ESTADO DEL ARTE.

LOCAL:

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUBSUELO EN EL RELLENO SANITARIO REGIONAL “LA CORTADA”, PAMPLONA (NORTE DE SANTANDER) A PARTIR DE DATOS GEOFÍSICOS.

Este artículo presenta una caracterización geotécnica del subsuelo en el Relleno Sanitario Regional “La Cortada”, Pamplona (Norte de Santander). Los parámetros geotécnicos fueron obtenidos a partir de datos geofísicos usando las técnicas de Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE). Este trabajo abarca el diseño, la adquisición, el procesamiento y la interpretación de los datos geofísicos. [14]

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).

En el artículo presente se aplicaron técnicas Geofísicas y Geotécnicas para la caracterización del subsuelo a la altura del Km 68+500 de la vía principal Troncal Central del Norte (Ruta Nacional 55). Las técnicas Geofísicas implementadas fueron: el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), Tomografía de Refracción Sísmica (TRS) y el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW de sus siglas en inglés). [16]

CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO ATRAVES DE MÉTODOS GEOTÉCNICOS Y GEOFÍSICOS EN LA URBANIZACIÓN VALLE DEL ESPÍRITU SANTO. (PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER)

En esta investigación presenta el uso de técnicas geofísicas y geotécnicas para caracterizar el subsuelo en la Urbanización Valle del Espíritu Santo en el municipio de Pamplona, departamento de Norte de Santander (Colombia). Las técnicas implementadas fueron: Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), Sondeos Eléctricos Verticales (SEV); y el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) para el caso geotécnico. El objetivo principal de este trabajo, fue obtener propiedades físicas y geotécnicas de los suelos en la zona de interés, y dar una explicación sobre las posibles causas de las fallas estructurales y patológicas de esta urbanización. [17]

NACIONAL:

CARACTERIZACIÓN DE CONTRASTES DE RIGIDEZ DE UNA LADERA EN LA VEREDA EL YOLOMBO EN EL CORREGIMIENTO DE SAN CRISTÓBAL, USANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS.

Este trabajo tiene como objetivo hallar con métodos indirectos de exploración del subsuelo perfiles de suelo con parámetros de rigidez en tres sectores de la ladera, con el fin de contribuir a la caracterización de los materiales involucrados en el movimiento en masa -- Para este propósito se usan métodos ReMi (refracción de microtemores), MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) y refracción sísmica. [18]

VALORACIÓN DEL PERFIL DE SUELOS RESIDUALES DE ANFIBOLITA POR ENSAYOS DE LÍNEA DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y MASW: CASO LAS PALMAS, ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

Se estudiaron formas alternas al ensayo ya establecido de la línea de refracción sísmica (línea recta), que permitan la utilización del ensayo en diferentes extensiones de terreno superficial (terrenos de poca longitud). Para esto se realizaron ensayos con diferentes formas geométricas (triángulo, círculo, “L”), usando el método de refracción sísmica y dispersión de ondas superficiales MASW pasivo –ReMi. A partir de estos dos métodos se encontró que para la refracción sísmica el estudio no es concluyente ya que los datos obtenidos a partir de este ensayo no brindan la información suficiente para hacer un reconocimiento de las diferentes capas del suelo en profundidad. [19]

INTERNACIONAL:

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARENOSOS MEDIANTE ANÁLISIS DE ONDAS DE SUPERFICIE.

En la década de 1980 se incorporó el uso de análisis de ondas de superficie al campo de la caracterización de suelos. Esta es una técnica no invasiva, en la cual se colocan sensores en la superficie del terreno para registrar la llegada de diversos tipos de ondas, y mediante diversos métodos de análisis se pueden obtener perfiles de variación de velocidad de onda de corte (VS) a profundidad. [20]

PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO PARA APLICAR LA GEOFÍSICA A ESTUDIOS GEOTÉCNICOS EN LA CIUDAD DE LUANDA, ANGOLA.

Se evaluó el uso del análisis de ondas superficiales en sus variantes activa y pasiva que, conjuntamente con la sísmica de refracción somera, permite determinar parámetros dinámicos a partir de las velocidades transversales y longitudinales obtenidas de los métodos sísmicos. a partir del comportamiento de las velocidades de las ondas sísmicas se logra la caracterizaron los suelos de Luanda, y se demuestra que un complejo de métodos sísmico conformado con la sísmica de refracción somera y el análisis multicanal de ondas superficiales en su variante 2D MASW permite obtener mayor continuidad en la caracterización geotécnica de los suelos. [21]

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.

Planteando el uso de la prospección geofísica con análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), sísmica de refracción y ensayos de laboratorio convencionales, este proyecto logro la caracterización geotécnica de horizontes estratigráficos de baja profundidad de la formación Mangán de la Ciudad de Cuenca, los cuales se localizan dentro de la profundidad de transmisión de esfuerzos en cimentaciones superficiales. [22]

VS30 MAPPING AND SOIL CLASSIFICATION FOR SEISMIC SITE EFFECT EVALUATION IN DINAR REGION, SW TURKEY.

Los valores de Vs30 calculados mediante el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) se utilizaron para crear un nuevo mapa de clasificación de suelos de la región de Dinar.

Los datos de dispersión de las ondas de Rayleigh registradas se invirtieron utilizando un método de algoritmo genético (GA) para obtener perfiles de velocidad de ondas de corte de los sitios investigados. [23]

MARCO LEGAL

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE

NSR-10: Título A (Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente).

Mediante esta norma (Tabla 2.4-1: Clasificación de los perfiles de suelo) se hará la respectiva clasificación de suelos de las líneas procesadas, teniendo en cuenta el parámetro V_{s30m} .

ASTM D5777: (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS).

Por medio de esta, se hará la clasificación de los perfiles de suelo mediante las variaciones de las velocidades de onda P (V_p) para cada línea de estudio.

METODOLOGÍA

Recopilación de datos sísmicos.

En la primera etapa, se revisaron los datos previamente adquiridos en la Urbanización Valle del Espíritu Santo, su trazado y disposiciones del lugar frente a la problemática que actualmente se vive.

Reprocesamiento.

MASW

En esta fase, mediante el software Surface Wave Analysis Wizard, se toman los datos y se verifica que estén de buena calidad (ver figura 6), haciéndolas respectivas correcciones para un obtener un buen resultado en el picado de primeros arribos. Seguido a ello, el diagrama de sensores y fuentes (Ver figura 7) presenta la dirección de estas últimas; la cuales indican, según sus posiciones, si el modelo se procesa para obtener perfiles de velocidad de onda S en una o dos dimensiones. Si el dato no está perfecto, se procede a hacer el picado de manera manual (ver figura 8) en la curva de dispersión experimental obtenida por medio del método de la transformada del dominio de Fourier, siguiendo los datos de máxima amplitud.

Una vez hecho el picado manual, se pasa al siguiente paso mediante el software WaveEq, donde se obtendrán las curvas de dispersión del modo fundamental de todos los disparos (ver figura 9). Acabado este paso, donde se puede ajustar la curva mediante las herramientas del software, se muestra el perfil del modelo inicial (ver figura 10), al cual se le hace una inversión con 5 iteraciones para obtener el modelo final de velocidades de onda de corte aparentes (ver figura 11).

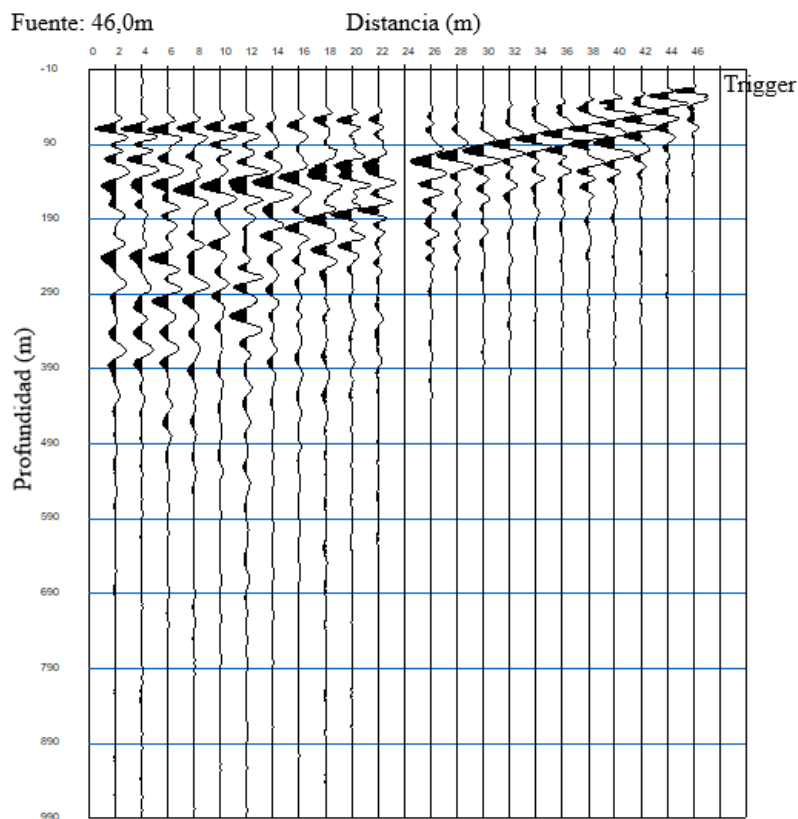


Figura 6: Procesamiento MASW 1D: Tren de Ondas Superficiales.

Fuente: Propia.

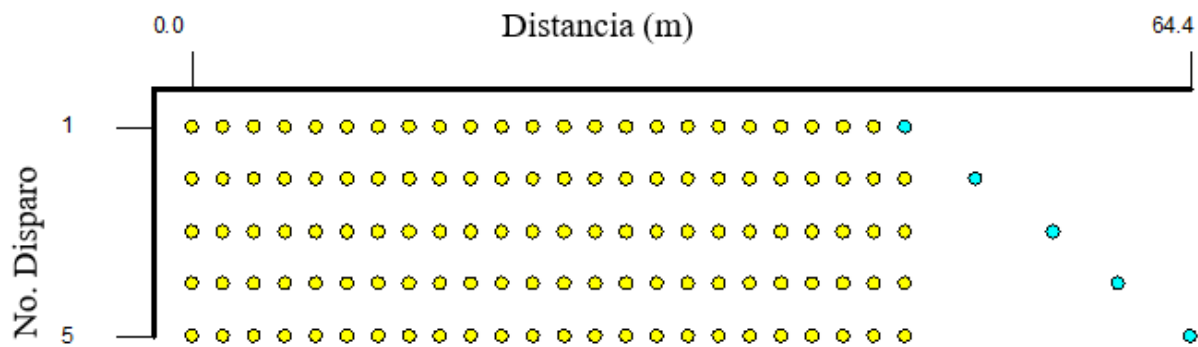


Figura 7: Distribución de Fuentes y Sensores.

Fuente: Propia.

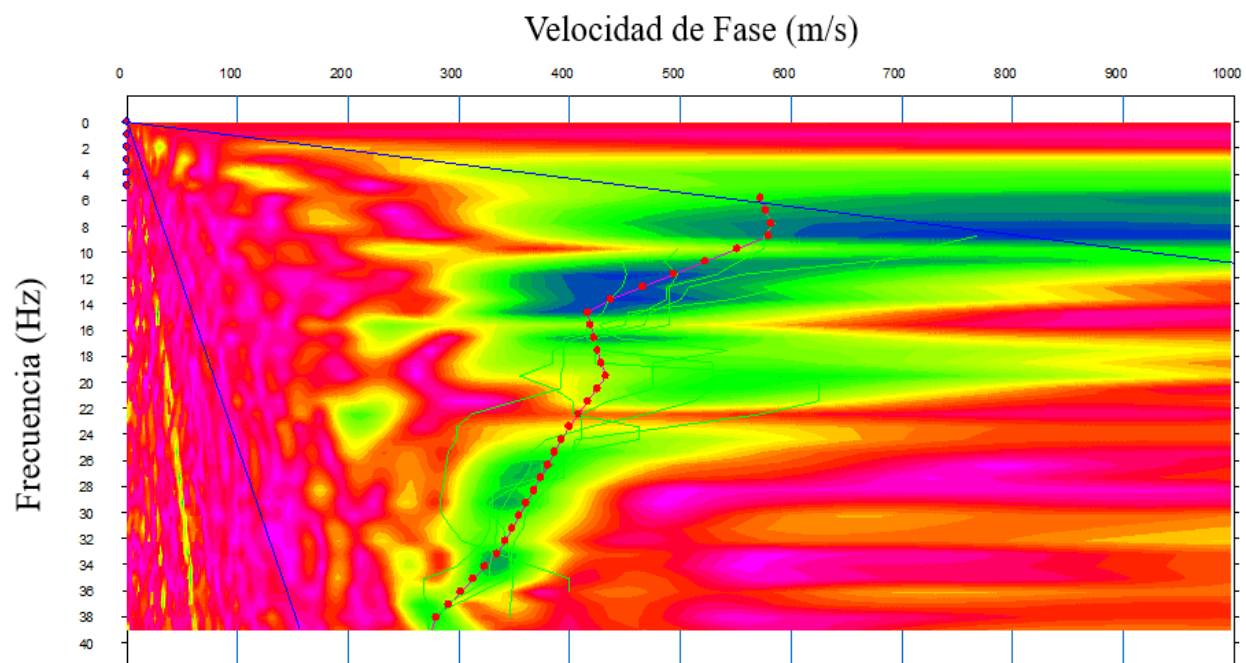


Figura 8: Procesamiento MASW 1D: Curva de dispersión experimental.

Fuente: Propia.

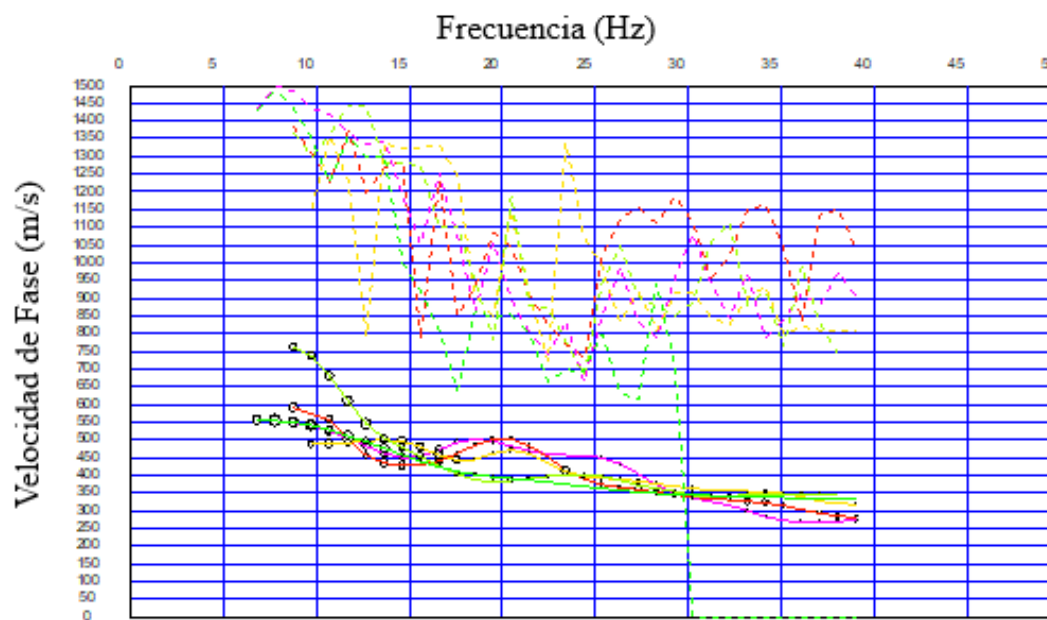


Figura 9: Curvas de dispersión - Modo fundamental de todos los disparos.

Fuente: Propia.

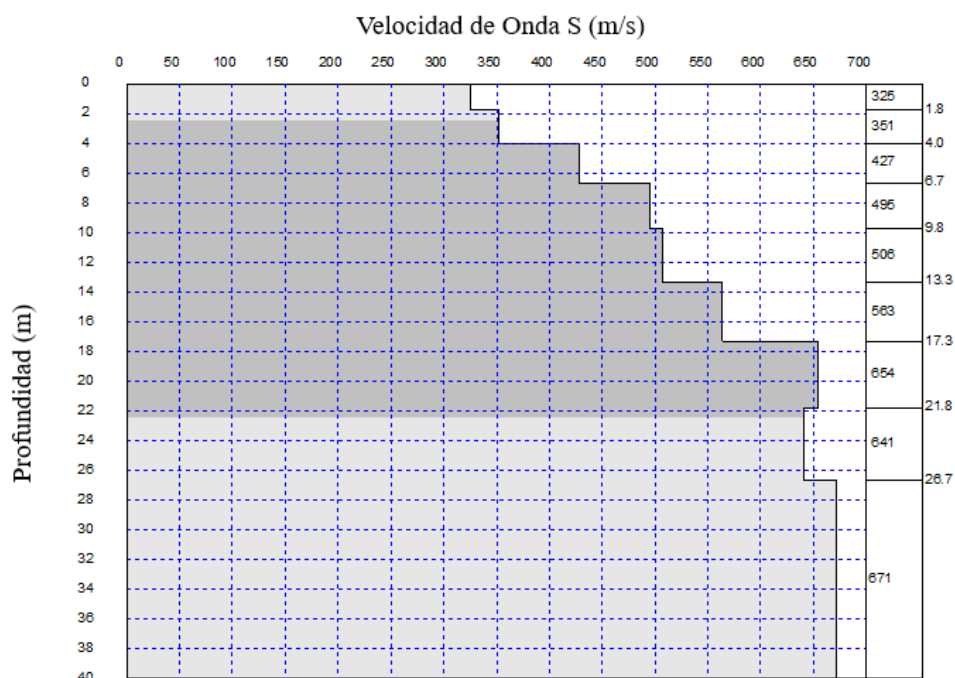


Figura 10: Procesamiento MASW 1D: Modelo teórico (inicial).

Fuente: Propia

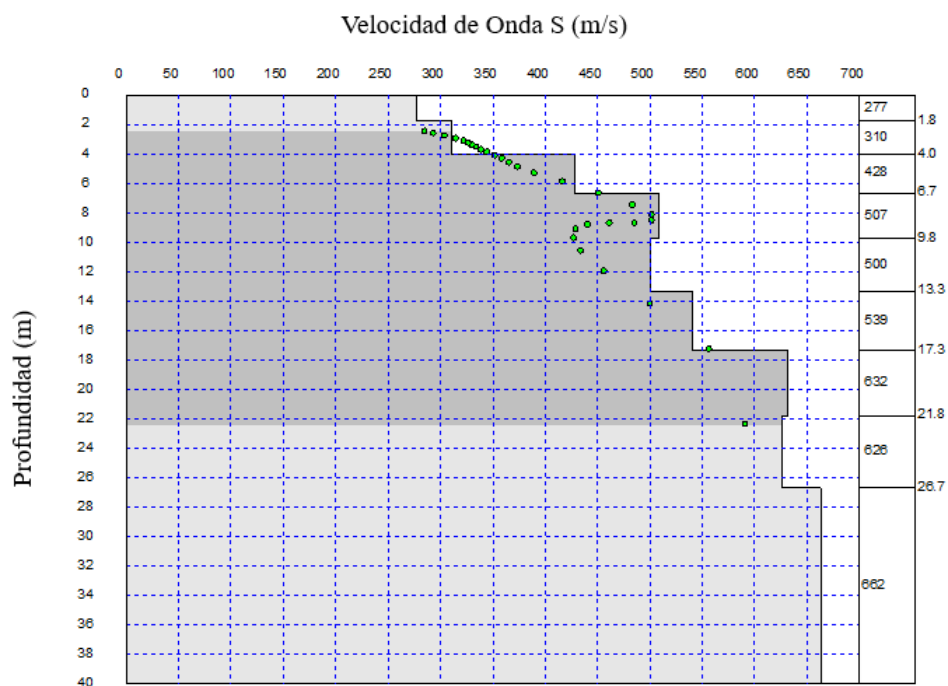


Figura 11: Procesamiento MASW 1D: Modelo final de velocidades aparentes reales.

Fuente: Propia.

TRS

En esta fase, mediante el software Pickwin y Plotrefa, se toman los datos y se verifica que estén de buena calidad, haciéndolas respectivas correcciones para un obtener un buen resultado en el picado de primeros arribos (Figura 12) para cada dato de la línea. Seguido a ello, el diagrama de datos calculados y observados (Figura 13) de estas últimas nos muestran el perfil del terreno para proceder a seleccionar las capas del mismo; luego se procesan estos estratos para obtener el modelo basado en la inversión de mínimos cuadrados (Figura 14).

Finalmente se obtiene el modelo a partir de la inversión de la tomografía (Figura 15), el cual nos muestra el perfil de velocidades de onda P (V_p) que utilizaremos para el cálculo de los parámetros dinámicos del suelo y la clasificación de los mismos mediante la ASTM D5777.

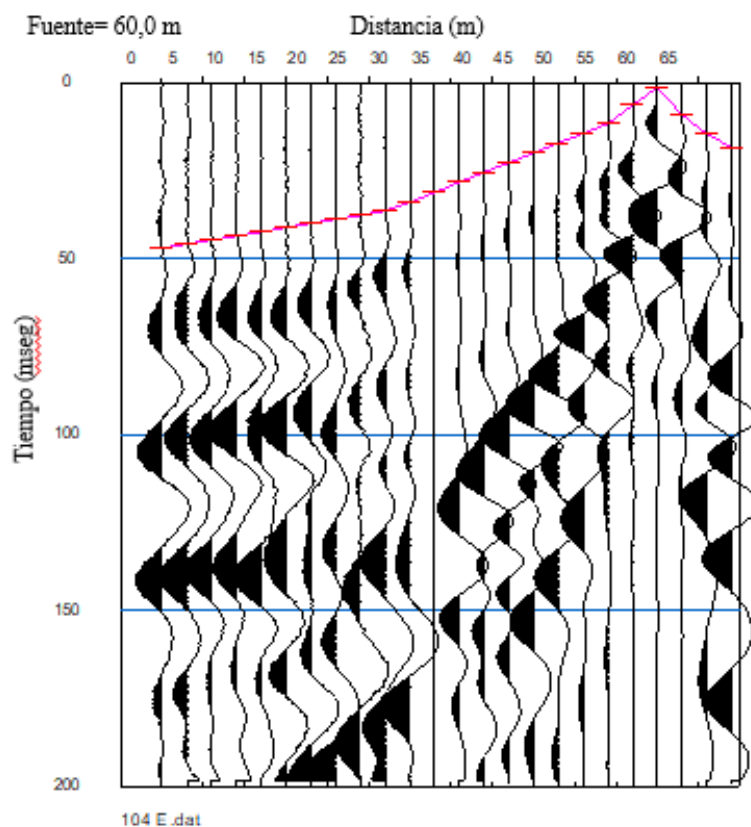


Figura 12: Picados primeros arribos

Fuente: Autor

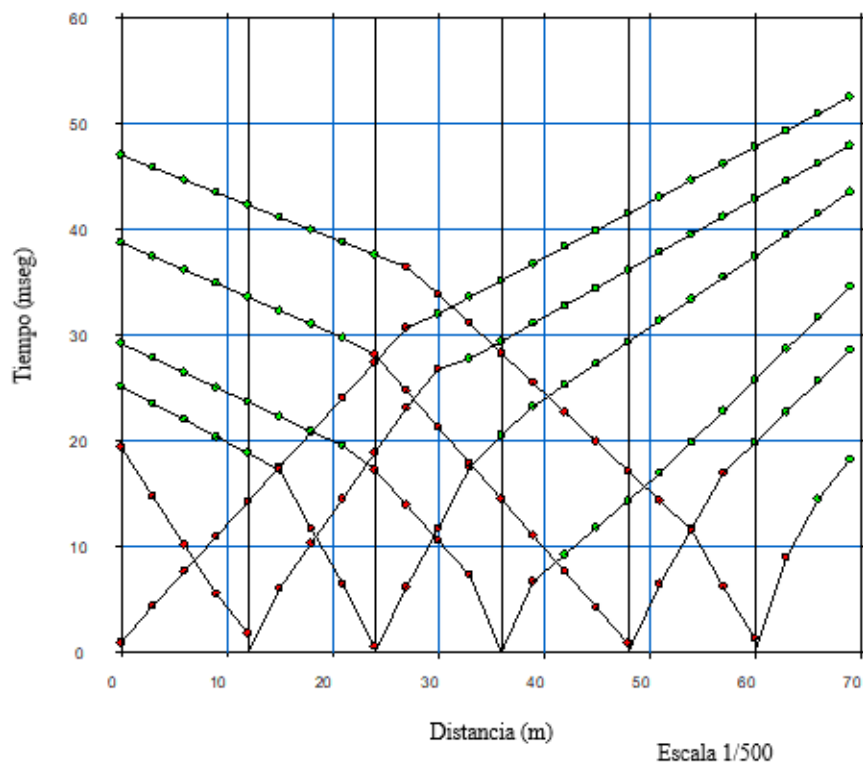


Figura 13: Datos observados Vs Calculados

Fuente: Autor

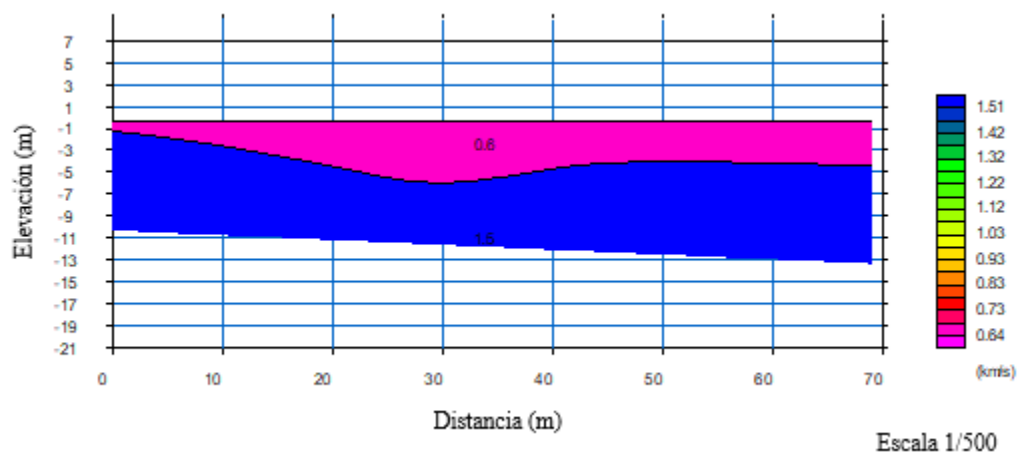


Figura 14: Modelo basado en la inversión de Mínimos Cuadrados

Fuente: Autor

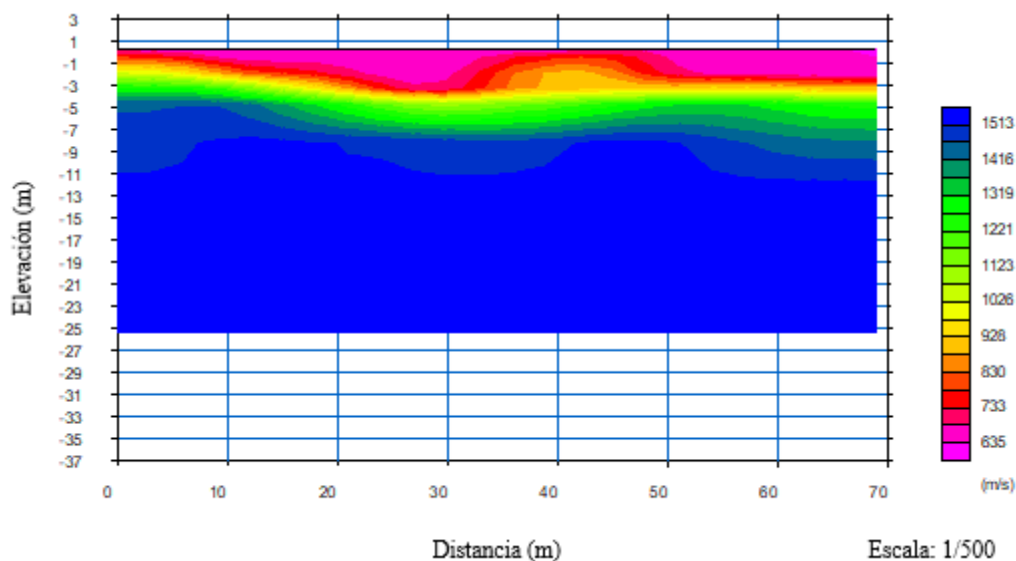


Figura 15: Modelo a partir de la inversión de la tomografía

Fuente: Autor

Análisis e integración de información.

En esta fase se plantean las velocidades por estratos para identificar el tipo de suelo del perfil mediante la tabla A.2.4-1 (Clasificación de los perfiles de Suelo) del título A de la NSR-10.

Tabla 1: Velocidad promedio a 30m del perfil y clasificación del suelo de la línea 1.

Fuente: Propia.

Estrato	Velocidad según índice					PROMEDIO	Tipo de suelo
	1	2	3	4	5		
1	258	277	314	345	334	305,6	D
2	299	310	335	345	347	327,2	D
3	444	428	415	395	387	413,8	C
4	525	507	485	458	444	483,8	C
5	500	500	503	506	503	502,4	C
6	537	539	547	556	556	547,0	C
7	629	632	635	638	634	633,6	C
8	616	626	642	655	657	639,2	C
9	658	662	666	668	663	663,4	C
Vs30m	495,1	499,5	509,7	512,8	507,8	505,0	C

Tabla 2: Velocidad promedio a 30m del perfil y clasificación del suelo de la línea 2.

Fuente: Propia.

Velocidad según índice							
Estrato	1	2	3	4	5	PROMEDIO	Tipo de suelo
1	246	270	293	305	296	282	D
2	252	267	287	297	288	278,2	D
3	245	250	261	268	260	256,8	D
4	265	264	264	266	260	263,8	D
5	311	312	313	315	313	312,8	D
6	331	342	357	368	373	354,2	D
7	317	335	362	383	393	358	D
8	324	331	342	351	358	341,2	D
9	262	278	305	338	365	309,6	D
10	494	496	499	501	507	499,4	C
Vs30m	315,6	327,1	344,3	360,4	368,7	343,22	D

Tabla 3: Velocidad promedio a 30m del perfil y clasificación del suelo de la línea 3.

Fuente: Propia.

Velocidad según índice							
Estrato	1	2	3	4	PROMEDIO	Tipo de suelo	
1	241	233	271	266	252,75	D	
2	193	193	212	214	203	D	
3	198	198	197	196	197,25	D	
4	267	268	267	267	267,25	D	
5	338	338	339	338	338,25	D	
6	382	384	385	386	384,25	C	
7	401	404	408	410	405,75	C	
8	403	405	409	411	407	C	
9	404	406	410	412	408	C	
10	427	427	427	427	427	C	
Vs30m	317,1	317,3	324,9	325,3	321,15	D	

Obtención de parámetros dinámicos.

La estimación de los parámetros mecánicos se realiza a través de las formulas establecidas por Sheriff en el año 1973 y para el cálculo de la capacidad portante, se utilizará el método establecido por Naranjo y Dranichnikov en el año 2012.

Tabla 4: Parámetros dinámicos - Línea 1

Fuente: Autor

Estrato	Profundidad (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ν	ρ	G (N/m ²)	E (N/m ²)	γ (KN/m ³)	Qa(Kpa)
1	1,8	305,6	977	0,44577	1,11816	104426,41	301954,06	17,954	7,4198
2	4	327,2	1367	0,46961	1,21611	130196,32	314673,15	19,234	17,7344
3	6,7	413,8	1513	0,45958	1,24735	213584,98	499847,73	20,026	31,4302
4	9,8	483,8	1513	0,44305	1,24735	291958,72	675529,23	20,026	46,5836
5	13,3	502,4	1513	0,43804	1,24735	314839,34	725937,91	20,026	63,4447
6	17,3	547,0	1513	0,42482	1,24735	373219,55	852638,14	20,026	83,2332
7	21,8	633,6	1513	0,39367	1,24735	500748,97	1118973,38	20,026	106,6587
8	26,7	639,2	1513	0,39137	1,24735	509639,71	1136962,75	20,026	130,7756

Tabla 5: Parámetros dinámicos - Línea 2

Fuente: Autor

Estrato	Profundidad (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ν	ρ	G (N/m ²)	E (N/m ²)	γ (KN/m ³)	Qa(Kpa)
1	1,8	296,0	721	0,39865	1,03637	90802,38	254000,66	17,442	7,1955
2	4	288,0	755	0,41486	1,04838	86956,43	234707,64	17,51	16,0289
3	6,7	260,0	906	0,45513	1,09727	74175,20	196733,16	17,812	27,1722
4	9,8	260,0	974	0,46164	1,11730	75529,47	197613,43	17,948	40,0479
5	13,3	313,0	991	0,44459	1,12214	109935,28	283050,99	17,982	54,9845
6	17,3	373,0	991	0,41748	1,12214	156122,71	394423,80	17,982	72,3193
7	21,8	393,0	991	0,40669	1,12214	173313,95	434524,42	17,982	91,4709
8	26,7	358,0	991	0,42496	1,12214	143818,40	365255,93	17,982	111,3036
9	22,7	365,0	991	0,42153	1,12214	149497,57	378765,8	18,482	97,3866

Tabla 6: Parámetros dinámicos - Línea 3

Fuente: Autor

Estrato	Profundidad (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ν	ρ	G (N/m ²)	E (N/m ²)	γ (KN/m ³)	Qa(Kpa)
1	1,8	252,8	607	0,3951	0,9927	63417,56	176950,89	17,214	7,0456
2	4	203,0	951	0,4761	1,1106	45768,55	121659,67	17,902	16,1367
3	6,7	197,3	1124	0,4841	1,1580	45056,31	115486,40	18,248	27,5228
4	9,8	267,3	1640	0,4864	1,2727	90902,62	212319,32	19,28	43,0769
5	13,3	338,3	1813	0,4820	1,3051	149315,56	339113,07	20,126	61,8275
6	17,3	384,3	2156	0,4836	1,3628	201219,44	438100,49	21,312	85,8914
7	21,8	405,8	2156	0,4816	1,3628	224367,13	487854,17	21,312	108,6686
8	26,7	407,0	2156	0,4815	1,3628	225751,69	490825,76	21,312	133,1252
9	22,7	408,0	2156	0,4814	1,3628	226862,39	493209,26	21,312	113,2025

RESULTADOS.

Obtención de las Velocidades sísmicas tipo P y S a partir de las técnicas TRS y MASW:

TRS:

Del procesamiento mediante la técnica por Tomografías de Refracción Sísmica se obtuvieron los perfiles de Velocidad de Onda P para cada línea. Posterior a ello, con la tabla de rango de V_p (ASTM D5777), se clasificaron los suelos a nivel general para cada línea.

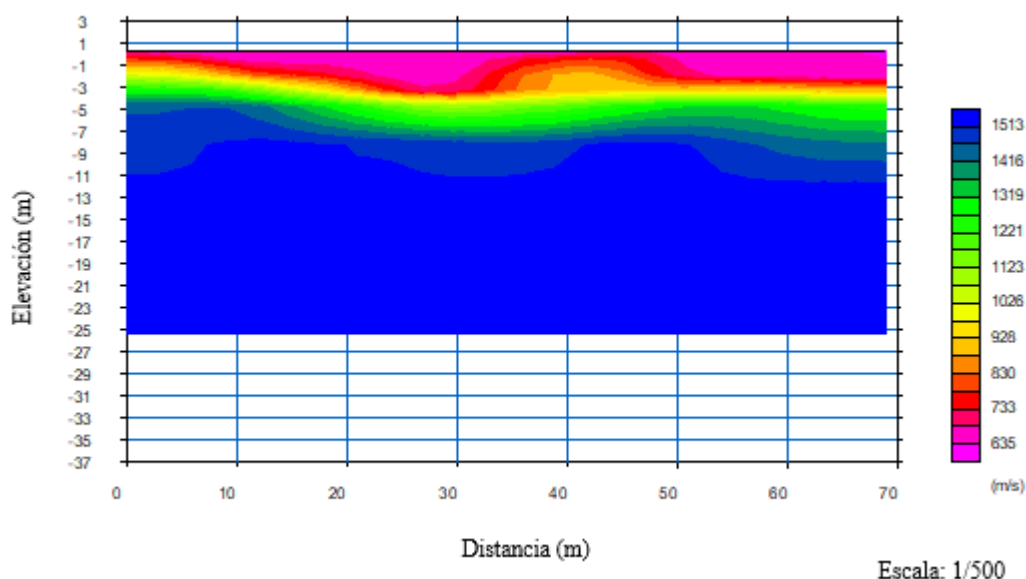


Figura 16: TRS - Línea 1

Fuente: Autor

Perfil sísmico a 25 metros de profundidad sobre la línea 1 (Figura 16): Se aprecian 3 capas.

Capa 1: valores de Velocidad de Onda P (V_p) entre 635 m/s y 733 m/s con un espesor variable de 1m a 3m. Tipo de Suelo: Grava o arena seca.

Capa 2: valores de Velocidad de Onda P (V_p) entre 928 m/s y 1319 m/s con un espesor variable de 3m a 4m. Tipo de suelo: Arcilla (saturada).

Capa 3: valores de Velocidad de Onda P (V_p) mayores a 1416 m/s. Tipo de Suelo: Arcilla (saturada).

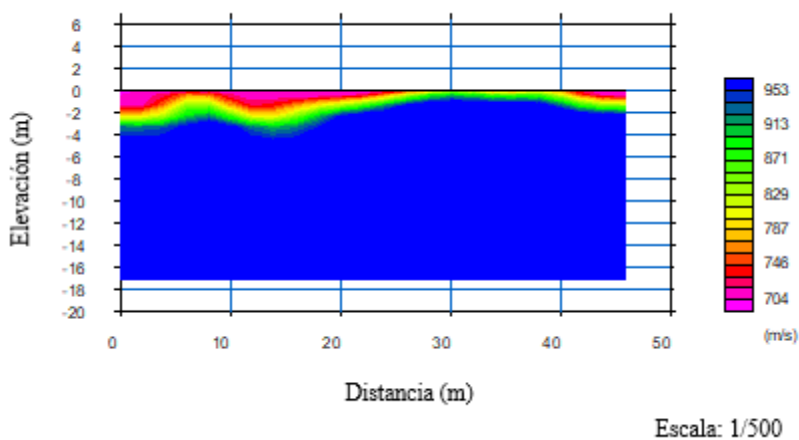


Figura 17: TRS - Línea 2

Fuente: Autor

Perfil sísmico a 17 metros de profundidad sobre la línea 2 (Figura 17): Se aprecian 3 capas.

Capa 1: valores de Velocidad de Onda P (V_p) entre 704 m/s y 746 m/s con un espesor variable de 1m a 3m. Tipo de suelo: Grava o arena seca.

Capa 2: valores de Velocidad de Onda P (V_p) entre 787 m/s y 871 m/s con un espesor variable de 3m a 4m. Tipo de suelo: Grava o arena seca.

Capa 3: valores de Velocidad de Onda P (V_p) mayores a 913 m/s. Tipo de suelo: Arcilla (saturada).

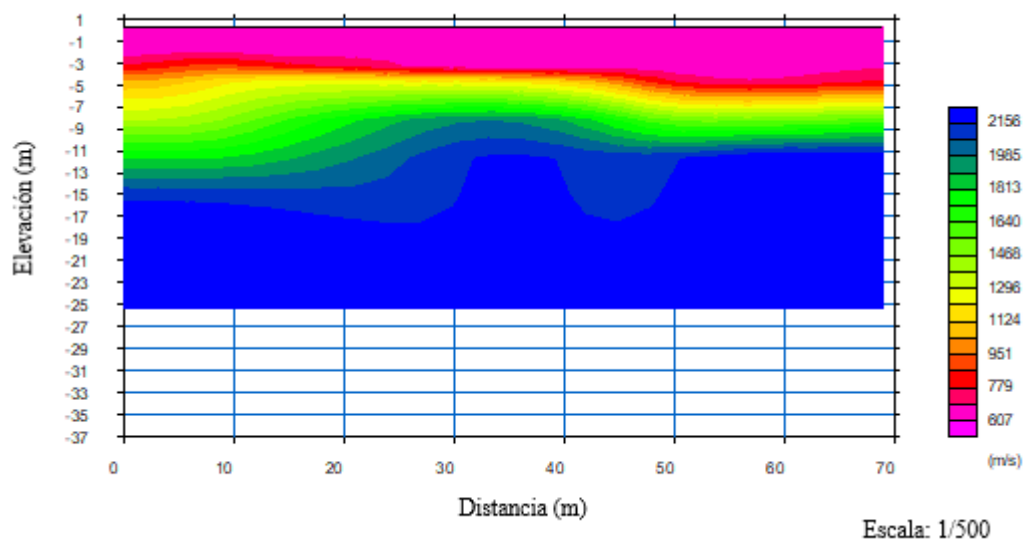


Figura 18: TRS - Línea 3

Fuente: Autor

Perfil sísmico a 25 metros de profundidad sobre la línea 3 (Figura 18): Se aprecian 3 capas.

Capa 1: valores de Velocidad de Onda P (V_p) entre 607 m/s y 779 m/s con un espesor variable de 1m a 3m. Tipo de suelo: Grava o arena seca.

Capa 2: valores de Velocidad de Onda P (V_p) entre 951 m/s y 1813 m/s con un espesor variable de 3m a 4m. Tipo de suelo: Arcilla (saturada).

Capa 3: valores de Velocidad de Onda P (V_p) mayores a 1985 m/s. Tipo de suelo: Arcilla (saturada).

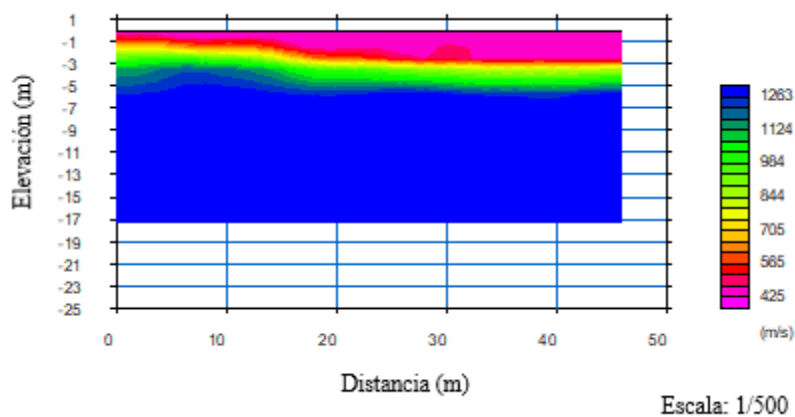


Figura 19: TRS - Línea 4

Fuente: Autor

Perfil sísmico a 17 metros de profundidad sobre la línea 4 (Figura 19): Se aprecian 3 capas.

Capa 1: valores de Velocidad de Onda P (V_p) entre 425 m/s y 565 m/s con un espesor variable de 1m a 3m. Tipo de suelo: Grava o arena seca.

Capa 2: valores de Velocidad de Onda P (V_p) entre 705 m/s y 984 m/s con un espesor variable de 3m a 4m. Tipo de suelo: Arcilla (saturada).

Capa 3: valores de Velocidad de Onda P (V_p) mayores a 1124 m/s. Tipo de suelo: Arcilla (saturada).

MASW

Mediante el procesamiento con la técnica MASW se obtiene el parámetro real Vs30m para clasificación del suelo a lo largo de las líneas de estudio.

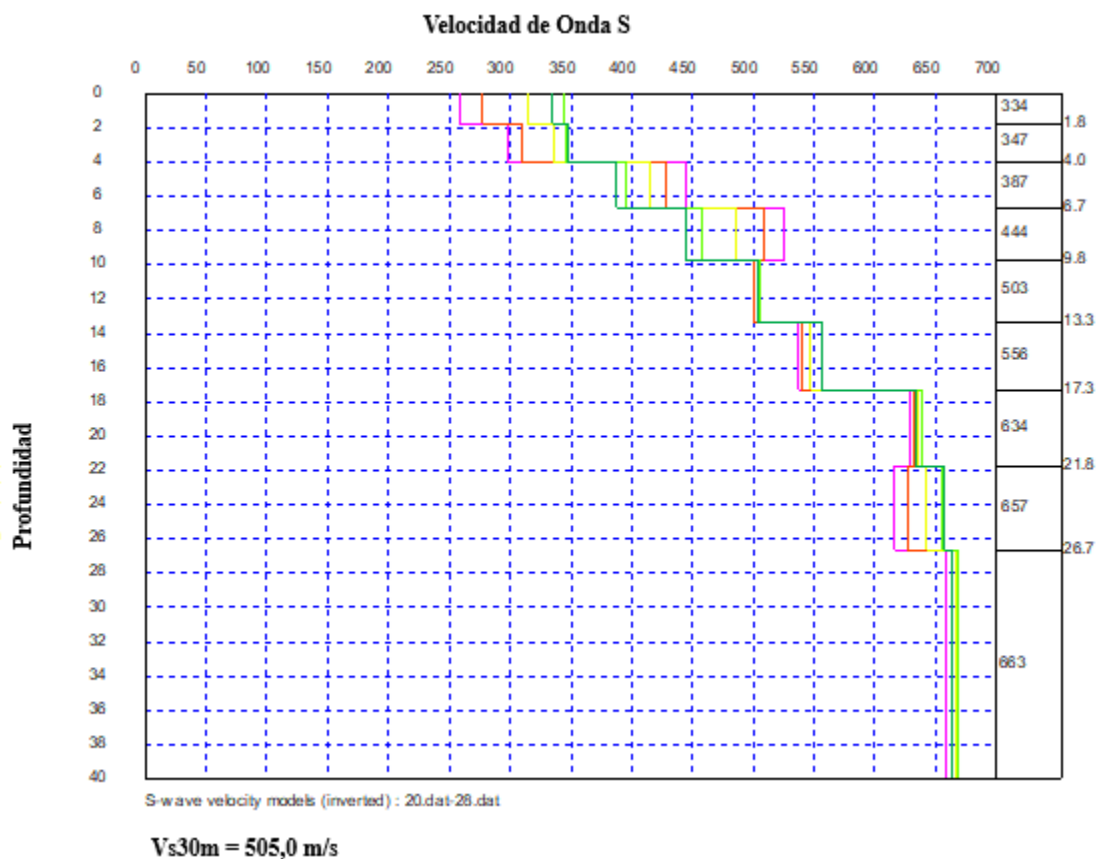


Figura 20: MASW - Línea 1

Fuente: Autor

Perfil sísmico de la línea 1 (Figura 20):

La velocidad aparente para el parámetro Vs30m oscila entre 305,6 m/s y 663,4 m/s a lo largo de la línea de estudio, arrojando como valor real un Vs30m=505,0 m/s.

En este perfil predomina, en su mayoría, el tipo de suelo C, según la tabla A.2.4-1 de la NSR-10, a lo largo de la línea de estudio.

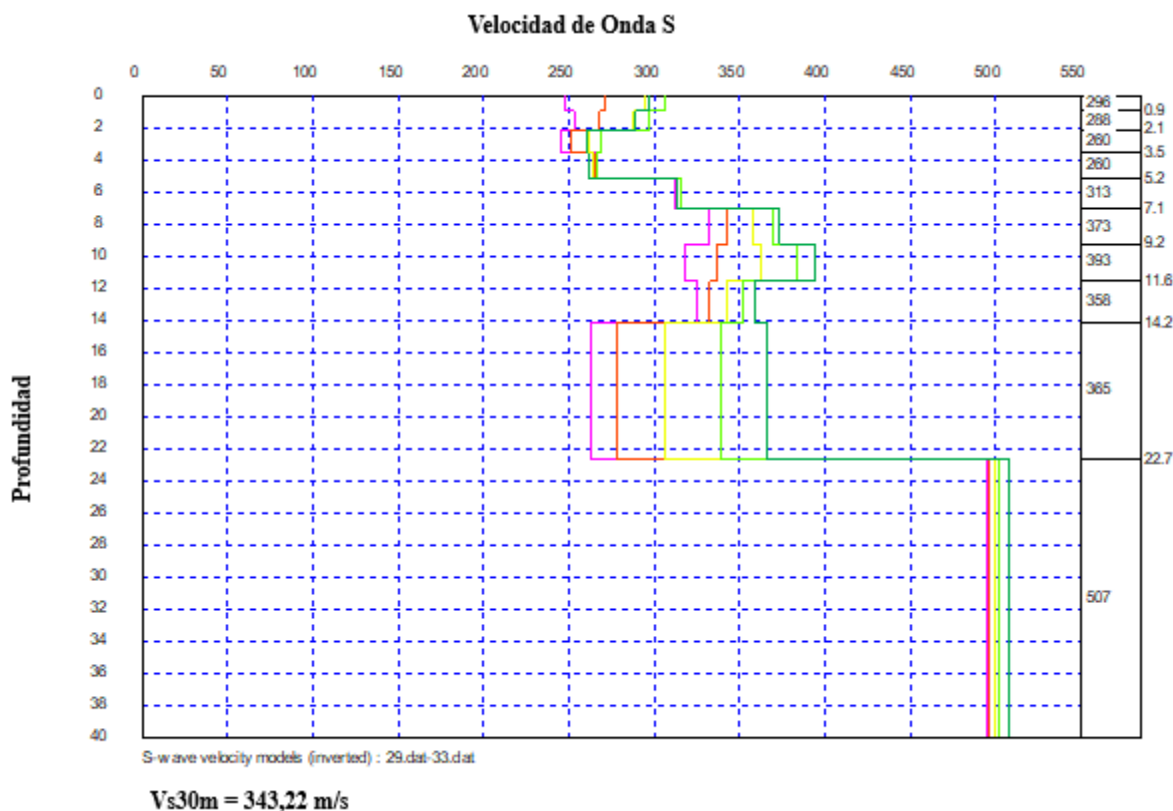


Figura 21: MASW - Línea 2

Fuente: Autor

Perfil sísmico de la línea 2 (Figura 21):

La velocidad aparente para el parámetro Vs30m oscila entre 282 m/s y 499,4 m/s a lo largo de la línea de estudio, arrojando como valor real un Vs30m=343,22 m/s.

En este perfil predomina, en su mayoría, el tipo de suelo D, según la tabla A.2.4-1 de la NSR-10, a lo largo de la línea de estudio.

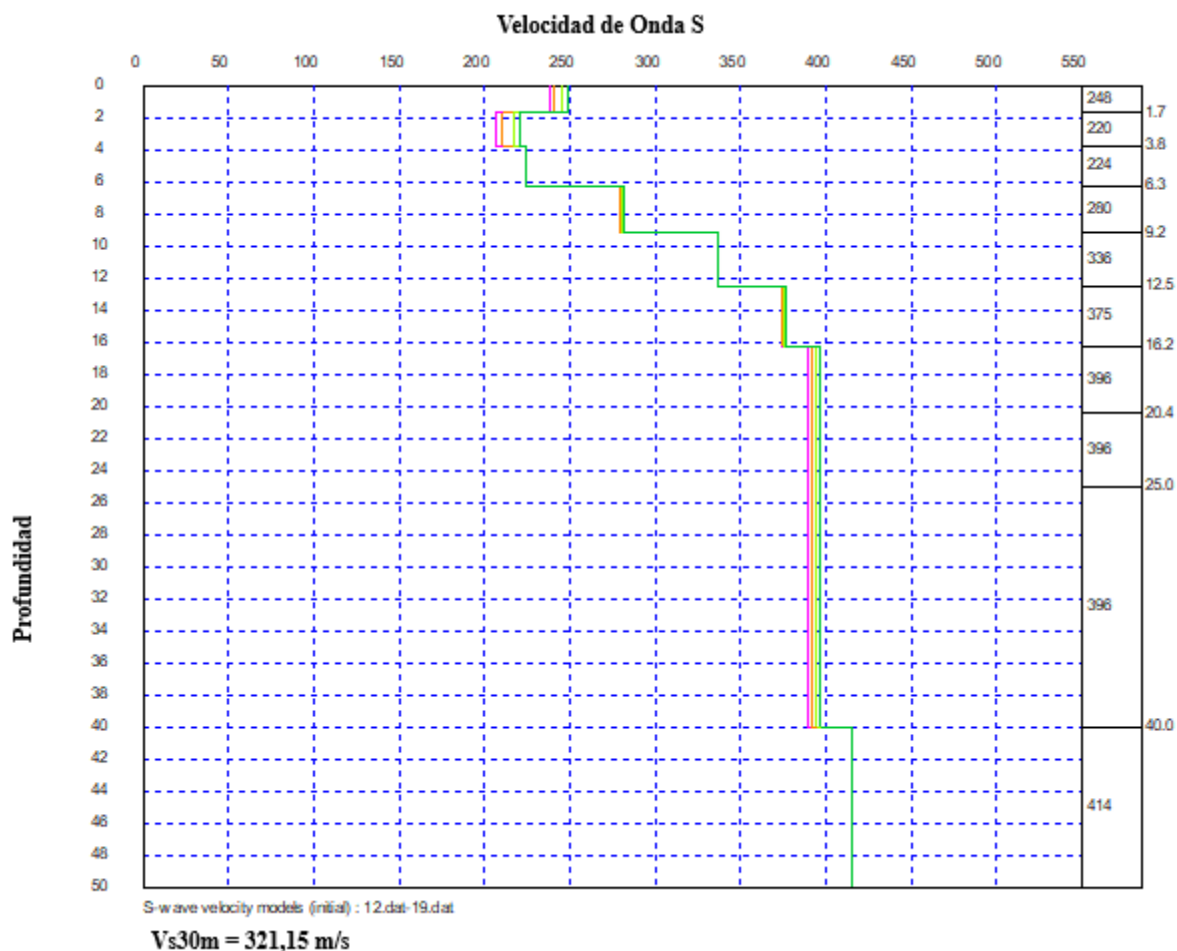


Figura 22: MASW - Línea 3

Fuente: Autor

Perfil sísmico de la línea 3 (Figura 22):

La velocidad aparente para el parámetro Vs30m oscila entre 252,75 m/s y 427 m/s a lo largo de la línea de estudio, arrojando como valor real un Vs30m=321,15 m/s.

En este perfil, se encuentran en casi que igual proporción el tipo de suelo C y D, según la tabla A.2.4-1 de la NSR-10, a lo largo de la línea de estudio.

Clasificación de los perfiles de suelo mediante la tabla A.2.4-1 del título A de la NSR-10:

Tabla 7: Clasificación del suelo - Línea 1

Fuente: Autor

Estrato	Tipo de suelo	Descripción	Definición
1	D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante.	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
2	D		
3	C		
4	C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante.	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
5	C		
6	C		
7	C		
8	C		
9	C		

Tabla 8: Clasificación del suelo - Línea 2

Fuente: Autor

Estrato	Tipo de suelo	Descripción	Definición
1	D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante.	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
2	D		
3	D		
4	D		
5	D		
6	D		
7	D		
8	D		
9	C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante.	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
10	D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante.	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$

Tabla 9: Clasificación del suelo - Línea 3

Fuente: Autor

Estrato	Tipo de suelo	Descripción	Definición
1	D		
2	D		
3	D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante.	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
4	D		
5	D		
6	C	Perfiles de suelos muy densos o roca	
7	C	blanda, que cumplan con el criterio de	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
8	C	velocidad de la onda cortante.	
9	C		
10	D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante.	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$

CONCLUSIONES

- Mediante las técnicas de TRS y MASW se pueden caracterizar, a grandes rasgos, los suelos en una determinada zona de estudio sin tener que recurrir a la exploración del terreno mediante perforaciones que, a lo largo de los ensayos in situ, pueden ocasionar una corta visión de los materiales o componentes del mismo.
- Para un mejor resultado en la estimación de los parámetros dinámicos, se optó por tomar solo las líneas que cumplían con la calidad óptima necesaria para ser procesadas, de tal manera que la estimación fuera lo más correcta posible.
- Para el procesamiento con MASW, se tomaron 3 líneas que se consideraron óptimas para el mismo, arrojando como resultado un parámetro real Vs30m que varía entre 505,0 m/s y 321,15 m/s, lo cual permitió identificar que en la zona de estudio predominan suelos tipo C y D que, según la NSR-10, son suelos asociados a depósitos aluviales con intercalación de limo y arcilla medianamente compactos.
- Para el procesamiento con la técnica de TRS, se tomaron 4 líneas que se consideraron óptimas para el procesamiento; las cuales, a través de las variaciones de Velocidades de Onda p (V_p), permitieron identificar que en la zona de estudio se presentan gravas o arenas secas en la superficie y Arcillas saturadas (en su mayoría) debajo de ella.
- Con el procesamiento mediante las técnicas de TRS y MASW, se estimaron los parámetros que definen la estructura, composición y comportamiento del suelo. Esto permitió identificar que el barrio “Valle del Espíritu Santo” está situado sobre un depósito aluvial que nuevamente puede ser alterado con la presencia de diferentes eventos meteorológicos y, por ende, debe ser estabilizado antes de llevar a cabo cualquier tipo de obras o mejoras en el mismo.

- Los métodos geofísicos son, sin duda alguna, las mejores herramientas para complementar la geotecnia, puesto que permiten, a grandes rasgos, la previa identificación de la zona de estudio a nivel general y, con ello, la realización de los apiques que, exclusivamente, sean necesarios para llevar a cabo futuras obras civiles en el sitio.
- La composición del suelo en la zona de estudio propicia la implementación de técnicas que optimicen y estabilicen el suelo antes de realizar cualquier tipo de obra civil para evitar el fenómeno de remoción de masas de tierra que, a su vez, son ocasionados por procesos de precipitación.
- Conociendo, a grandes rasgos, la estructura del suelo en el sitio de estudio, se pueden estimar y posteriormente corregir, incluso evitar, los posibles eventos meteorológicos que lleven a colapsar o desestabilizar la composición del mismo y, de alguna manera, lograr preservar las diferentes construcciones aledañas a la zona.

RECOMENDACIONES

- Es necesario hacer un buen uso del equipo sísmico al momento de la recopilación de datos para evitar errores que impidan el impecable uso de los mismos en la etapa del procesamiento o reprocesamiento, de tal manera que la estimación de los parámetros sea lo más acertada posible.
- Implementar ensayos geotécnicos junto a los estudios geofísicos establecidos en la zona de estudio para generar confiabilidad al correlacionarlos entre sí.
- Caracterizar los suelos de manera mecánica (geotecnia) para establecer un estudio minucioso como soporte antes de realizar cualquier tipo de construcción civil en el área de estudio.
- Plantear un plan de estabilización de suelos para la debida realización de futuras mejoras a las viviendas afectadas o posibles proyectos previstos a ejecutar en la zona de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Agustín Patiño, J. S. (2015). Valoración del perfil de suelos residuales de anfibolita por ensayos de línea de refracción sísmica y MASW: Caso Las Palmas, Escuela de Ingeniería de Antioquia. [12]
- Agustín Patiño, J. S. (2015). Valoración del perfil de suelos residuales de anfibolita por ensayos de línea de refracción sísmica y MASW: Caso Las Palmas, Escuela de Ingeniería de Antioquia. [19]
- Alcaldía Municipal de Pamplona, Plan de Básico de Ordenamiento Territorial (P.B.O.T). Pamplona, Norte de Santander. Enero 2017. [1]
- Arias, P. M. C. (2019). Caracterización geotécnica de la formación Mangán, mediante métodos geofísicos. Tesis Doctoral. UNIVERSIDAD DE CUENCA. [22]
- Condori Nifla, M. A. (2016). Caracterización estratigráfica y microzonificación sísmica del distrito de Chimbote mediante el Ensayo MASW. [10]
- Correia Machuca, N. A. (2015). Obtención del perfil de velocidad de onda de corte mediante método MASW y comparación con ensayo tipo downhole en estaciones sismológicas de zona central. [5]
- del Castillo, S. L. D. (2007). Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie. Academiadeingenieriademexico. Mx. [2]
- del Castillo, S. L. D. (2007). Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie. Academiadeingenieriademexico. Mx. [20]
- Gutierrez, A. J. 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. [16]

- Kanlı, A. I., Tildy, P., Prónay, Z., Pınar, A., & Hermann, L. (2006). VS 30 mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey. *Geophysical Journal International*, 165(1), 223-235. [23]

- Navarro López, J. F. (2018). Aplicación del método sísmico MASW para la caracterización sísmica del suelo en zona urbana. [11]

- Pereira de Barros da Silva, M. A., Fernández Núñez, H. M., Júnior Baptista, J., & Pereira Teixeira Pires, G. J. (2018). Procedimiento metodológico para aplicar la geofísica a estudios geotécnicos en la ciudad de Luanda, Angola. *Minería y Geología*, 34(2), 181-198. [4]

- Pereira de Barros da Silva, M. A., Fernández Núñez, H. M., Júnior Baptista, J., & Pereira Teixeira Pires, G. J. (2018). Procedimiento metodológico para aplicar la geofísica a estudios geotécnicos en la ciudad de Luanda, Angola. *Minería y Geología*, 34(2), 181-198. [21]

- Pérez Arzuaga, M. E. (2019). Caracterización del subsuelo a través de métodos geotécnicos y geofísicos en la urbanización valle del espíritu santo (Pamplona, Norte de Santander). Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil. [17]

- Portal Gonzales, T. J. (2017). Estudio geofísico por el método de refracción sísmica y masw para el mejoramiento y ampliación de cinco puentes en la Región de Junín. [8]

- Rivera Zeta, M. A., Piedra Rubio, R., & Paripanca García, Y. (2016). Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones. [13]

- Sánchez-Duarte, J. A., Contreras, M. A., & Torres, J. A. (2020). Caracterización geotécnica del subsuelo en el relleno sanitario regional “la Cortada”, Pamplona (Norte de Santander) a partir de datos geofísicos. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 2(36), 9-17. [14]
- Sanín Zuluaga, M. (2017). Caracterización de contrastes de rigidez de una ladera en la vereda El Yolombo en el corregimiento de San Cristóbal, usando métodos geofísicos (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT). [18]
- Serna Vásquez, A. F. (2015). Evaluación de la resolución del método de análisis de dispersión de ondas superficiales MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) en suelos residuales. Escuela de Ingeniería Civil. [7]
- Villilli Vargas, N. F. (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. [3]
- Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., & Tian, G. (2003). Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes. *Journal of Applied Geophysics*, 52(1), 45-57. [15]
- Zevallos Flores, A. S. (2016). Estudio geofísico por los métodos de refracción sísmica y MASW para el represamiento de las lagunas Chaupicocha, Chinchicocha y Totorapampa La Merced–Churcampa–Huancavelica. [9]
- Zevallos Flores, A. S. (2017). Métodos de refracción sísmica MASW-MAM y parámetros elásticos del puente vehicular Interregional Pampas. Ayacucho–Apurímac. 2016. [6]