

REVISION DE LAS DIFERENTES TECNICAS GEOFISICAS APLICADAS A RELLENOS
SANITARIOS EN ZONAS CLAUSURADAS, CON EL FIN DE APROVECHAR EL
RECURSO SUELO, BAJO PARAMETROS DINAMICOS ESTIPULADOS EN LA NSR-10
COLOMBIANA.

JONH FREDDY ACUÑA DESALVADOR

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS CIVIL Y AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
PAMPLONA, 2020

REVISION DE LAS DIFERENTES TECNICAS GEOFISICAS APLICADAS A ii
RELLENOS SANITARIOS EN ZONAS CLAUSURADAS, CON EL FIN DE APROVECHAR
EL RECURSO SUELO, BAJO PARAMETROS DINAMICOS ESTIPULADOS EN LA NSR-
10 COLOMBIANA.

JONH FREDDY ACUÑA DESALVADOR

COD 7173088

Trabajo de Grado para Optar el Título de:

Ingeniero Civil

Director

JAIRO ALBERTO TORRES PEÑA

Físico

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS CIVIL Y AMBIENTAL

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER

2020

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

Dedicatoria

*A Dios, por su infinita bondad y misericordia, por ser mi guía y mi sustento, por permitirme
llegar a este momento tan importante en mi vida.*

*A mi esposa Yenny Morales, por tu ayuda fundamental e incondicional, por estar ahí a mi lado
en esos momentos tan difíciles, siempre brindándome su amor, comprensión y apoyo.*

*A mis hijos Daniel, Camilo y Thomas Acuña Morales, por ser esa razón de salir adelante,
fuente de motivación y superación a las adversidades de esta vida.*

*A mi madre María Elsa, que con su esfuerzo y superación sacó adelante a sus hijos, su
formación, valores y constancia, plasmaron personas de bien a esta sociedad.*

Agradecimientos

En primer lugar, a Dios todo poderoso, a mi familia y a todos aquellos que hicieron posible este logro personal.

Al Dr. Efrén Hernández Díaz, que, con su gestión hacia el departamento de Casanare, visualizó el sueño de toda familia de ver a sus hijos profesional y no muy lejano, la educación gratuita para cada colombiano. Mi inmensa gratitud, pronta recuperación.

A la Universidad de Pamplona con su cuerpo de docentes y directivos que día a día estuvieron ahí en ese proceso de formación. Al ingeniero Manuel Contreras por ese apoyo en la culminación de este propósito personal y todo su grupo de profesional en el Departamento de Ingeniería Civil. Al profesor Jairo Torres, Físico a la vanguardia de las exigencias de esta profesión tan importante en la ingeniería y el mundo de la ciencia y tecnología. A todos compañeros y amigos...Gracias.

Resumen

En los rellenos sanitarios, ingresan desechos que se van acumulando por medio de procesos de compactación reduciéndolos al menor volumen posible y cubriéndolos con tierra, mediante la construcción de celdas. Normalmente los rellenos sanitarios presentan dos zonas, una clausurada cuando ha cumplido su capacidad operativa y la otra activa. En esta investigación se desea revisar los datos obtenidos en los ensayos de refracción sísmica y MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), por los autores Mancilla, Yanier Hinojosa en los primeros modelamiento y Ana María Hernández y Liset Pabón en un segundo modelamiento, realizados para la zona clausurada del relleno “La Cortada” municipio de Pamplona, Norte de Santander, el contraste de velocidad de ondas P y ondas S, datos necesarios para determinar los parámetros dinámicos del suelo mediante modelos matemáticos, con el fin de realizar una correcta clasificación de acuerdo a la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10, determinando el tipo de suelo presente y sus características, analizando la viabilidad de un aprovechamiento con escenarios útiles para la comunidad y que cumpla con los requerimientos de ley necesarios.

In the sanitary landfills, waste that accumulates through compaction processes, reducing it to the smallest possible volume and covering it with earth, through the construction of cells, enters. Normally, sanitary landfills have two zones, one closed when it has fulfilled its operational capacity and the other active. In this research we want to review the data obtained in the seismic refraction tests and MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), by the authors Mancilla, Yanier Hinojosa in a first modeling and Ana María Hernández and Liset Pabón in a second modeling, carried out for the closed area of the “La Cortada” landfill, Pamplona municipality, Norte de Santander, the contrast of P waves and S waves velocity, data necessary to determine the dynamic parameters of the soil through mathematical models, in order to make a correct classification of According to the Colombian Earthquake Resistant Standard NSR-10, determining the type of soil present and its characteristics, analyzing the viability of a use with useful scenarios for the community and that complies with the necessary legal requirements.

Resumen VI
Abstract VII
Lista de tablas XI
Lista de figurasXIII

Capítulo 1: Introducción

1.1 Justificación y Planteamiento del Problema.....3
1.2 Objetivo General.....5
 1.2.1 Objetivos Específicos.....5

Capítulo 2: Descripción de la zona de estudio

2.1 Marco Geográfico.....6
 2.1.1 Localización.....6
2.2 Marco Conceptual.....8
2.3 Marco Geológico.....9

Capítulo 3: Marco teórico

3.1 Métodos geofísicos aplicados a las zonas del relleno sanitario.....11
3.2 Caracterización del suelo.....12
3.3 Parámetros dinámicos del subsuelo.....13
 3.3.1 Modulo de volumen (compresibilidad volumétrica k)14

3.3.2 Modulo de Young (E).....	14	ix
3.3.3 Modulo de cizalla (rigidez G).....	14	
3.3.4 Coeficiente de Poison (v).....	15	
3.3.5 Capacidad de carga (qa).....	15	
3.4 Ondas sísmicas.....	15	
3.5 Tipos de ondas sísmicas.....	16	
3.5.1 Ondas sísmicas corporales.....	16	
3.5.1.1 Ondas P.....	16	
3.5.1.2 Ondas S.....	17	

Capítulo 4: Resultados obtenidos en los modelamientos aplicados a zonas activas y clausuradas del relleno sanitario

4.1 Modelamientos realizados.....	18
4.1.1 Primer modelamiento.....	18
4.1.1.1 Titulo de estudio.....	19
4.1.1.2 Métodos aplicados.....	19
4.1.1.3 Resultados.....	19
4.1.2 Segundo modelamiento.....	20
4.1.2.1 Titulo de estudio.....	20
4.1.2.2 Métodos aplicados.....	21
4.1.2.3 Resumen.....	21
4.1.2.4 Resultados.....	21

4.1.3 Tercer modelamiento.....	25	x
4.1.4.1 Título de estudio.....	25	
4.1.3.2 Métodos aplicados.....	25	
4.1.3.3 Resultados.....	26	
4.1.4 Cuarto modelamiento.....	33	
4.1.4.1 Título de estudio.....	33	
4.1.4.2 Métodos aplicados.....	33	
4.1.4.3 Resumen.....	34	
4.1.4.4 Resultados.....	34	
4.1.5 Quinto modelamiento.....	37	
4.1.5.1 Título de estudio.....	37	
4.1.5.2 Métodos aplicados.....	37	
4.1.5.3 Resumen.....	38	
4.1.5.4 Resultados.....	38	

Capítulo 5: Contraste de los resultados obtenidos de las ondas de velocidad Vs, mediante la aplicación de los métodos geofísicos con lo que establece la norma NSR-10 en cuanto a caracterización y parámetros dinámicos del suelo.

5.1 Aspecto en la clasificación del tipo de perfil de suelo.....	45
5.1.1 Parámetros empleados en la definición.....	45
5.2 Aspectos en la utilización de estudios sísmicos y geotécnicos.....	47
5.3 Aspectos en la determinación de los parámetros dinámicos del suelo.....	48

5.4 Cuadro comparativo en la utilización de las ondas Vp y Vs para determinar parametros dinámicos y diseño.....	xi
	50

Capítulo 6: Concepto técnico en la implementación de métodos geofísicos aplicados a zonas clausuradas de rellenos sanitarios, sus resultados y la disposición de la norma NSR-10 Colombiana, con el fin de aprovechar el recurso suelo.

6.1 Concepto técnico en la investigación.....	52
Conclusiones.....	55
Lista de referencias.....	56

Figura 2-1. Mapa de localización de zona de estudio RS La Cortada.....	7
Figura 2-2. Descripción geológica de la zona de estudio.....	9
Figura 3-1. Modelo de propagación de ondas P(A) y ondas S(B).....	17
Figura 4-1 Localización de las 7 líneas adquiridas para el estudio.....	18
Figura 4-2 Tomografía línea 2.....	19
Figura 4-3 Resultados de la resistividad para las 5 líneas adquiridas.....	20
Figura 4-4 Localización de las 5 líneas en zonas activa y clausurada.....	20
Figura 4-5 Distribución de las 5 líneas en zonas activa y clausurada.....	22
Figura 4-6 Modelo inicial propuesto para la línea L2 TRS.....	22
Figura 4-7 Flujo de Procesamiento de MASW en la línea L2.....	23
Figura 4-8 Sección de resistividades reales obtenida para la L2 incluyendo topografía.....	23
Figura 4-9 Modelo final integración de datos geofísicos línea L2 incluyendo la topografía...	24
Figura 4-10 Localización de las 7 línea de estudio relleno sanitario La Cortada.....	25
Figura 4-11 Resultados de ondas Vp y Vs línea 1.....	26
Figura 4-12 Resultados de ondas Vp y Vs línea 2.....	27
Figura 4-13 Resultados de ondas Vp y Vs línea 3.....	28
Figura 4-14 Resultados de ondas Vp y Vs línea 4.....	29
Figura 4-15 Resultados de ondas Vp y Vs línea 5.....	30
Figura 4-16 Resultados de ondas Vp y Vs línea 6.....	31
Figura 4-17 Resultados de ondas Vp y Vs línea 7.....	32
Figura 4-18 Localización de la línea de estudio relleno sanitario La Cortada.....	33
Figura 4-19 Interpretación de resultados de refracción sísmica.....	34

Figura 4-20 Interpretación de resultados de MASW.....	35xiii
Figura 4-21 Interpretación de resultados de refracción sísmica.....	35
Figura 4-22 Perfil final de suelo con geología local.....	36
Figura 4-23 Líneas de estudio relleno sanitario La Cortada zona clausurada.....	37
Figura 4-24 Resultados de refracción sísmica (velocidad de onda P) línea 4.....	38
Figura 4-25 Resultados modelo final MASW (velocidad de ondas S) línea 4.....	39
Figura 4-26 Resultados de refracción sísmica (velocidad de onda P) línea 5.....	40
Figura 4-27 Resultados modelo final MASW (velocidad de ondas S) línea 5.....	41
Figura 4-28 Resultados de refracción sísmica (velocidad de onda P) línea 6.....	42
Figura 4-29 Clasificación del suelo línea 4.....	44
Figura 5-1. Denotación de velocidad media de la onda cortante V_s	36
Figura 5-2. Clasificación del perfil de suelo media de la velocidad de onda V_s	36
Figura 5-3. Criterio para clasificar los suelos de los perfiles C, D o E.....	37

Tabla 3-1. Velocidades de Onda Asociadas a los diferentes tipos de Suelos.....	13
Tabla 4-1 Rango de valores obtenidos para todas las líneas en la zona de estudio.....	24
Tabla 4-2 Parámetros dinámicos obtenidos con los métodos aplicados SRT y MASW.....	36
Tabla 4-3 Descripción de velocidades V_p y V_s línea 4.....	39
Tabla 4-4 Parámetros dinámicos línea 4.....	40
Tabla 4-5 Descripción de velocidades V_p y V_s línea 5.....	41
Tabla 4-6 Parámetros dinámicos línea 5.....	42
Tabla 4-7 Descripción de velocidades V_p y V_s línea 6.....	43
Tabla 4-8 Parámetros dinámicos línea 6.....	43
Tabla 5-1. Modelos matemáticos para determinar los parámetros dinámicos del suelo.....	49
Tabla 5-2. Valores típicos relación de Poisson.....	49
Tabla 5-3. Cuadro comparativo en la utilización de las ondas V_p y V_s para determinar parámetros dinámicos y diseño dispuestos.....	50 y 51

Capítulo 1

Introducción

Partiendo del concepto de geofísica, podemos enunciar que es la ciencia que estudia las propiedades físicas de la tierra, dicho de otra manera, determina la estructura de la tierra a partir de diversas propiedades físicas características de cada material que la forman. En sus aplicaciones a la geotecnia (y en la ingeniería civil en general) estas técnicas ayudan a resolver diversos problemas que se pueden encontrar en los primeros metros de profundidad del subsuelo.

Estas técnicas presentan ventajas asociadas a su relativo, bajo costo, la posibilidad de cubrir grandes extensiones de terreno y que no son técnicas destructivas. Como inconvenientes se puede destacar la posible indeterminación de los resultados debido a que son técnicas indirectas que requieren un proceso de inversión de datos y la disminución de la resolución con el aumento de la profundidad investigada. Una buena práctica en la utilización de la geofísica implica el uso de, al menos, dos métodos distintos que nos permitan resolver la indeterminación o el apoyo en otras técnicas de reconocimiento.

Con la aplicación de los métodos geofísico podemos reconocer el terreno, obtener información de la estructura del subsuelo, determinar la deformabilidad de los materiales (cálculo de módulos dinámicos), podemos establecer la profundidad del nivel freático y del sustrato rocoso. Al igual nos brinda información para establecer cavidades y fracturas

(naturales o artificiales), evalúan el grado de eficacia de tratamientos en la mejora del terreno. Sumado a eso nos pueden valorar daños en estructuras existentes, filtraciones en presas, estado del terreno bajo losas de hormigón, localización de estructuras enterradas, tuberías, túneles, restos arqueológicos. En general las aplicaciones de estos métodos geofísicos nos ofrecen un sin número de beneficios para el desarrollo de nuestra obras geotécnicas y civiles.

1.1 Justificación y Planteamiento del Problema

Uno de los problemas que afrontan hoy en día los rellenos sanitarios, es la mala utilización y destinación de las zonas clausuradas, pues dichos residuos se disponen en niveles, que es una combinación de disposición por área y terrazas por la ondulación del terreno para ser optimizadas en la aglomeración de residuos, exponiéndose con el tiempo ante un evento de remoción en masa y emisión de gases producidos por los residuos que se entierran allí.

La capacidad de estos rellenos tarde o temprano se copan, entonces ahora las autoridades competentes quieren autorizar la disposición de residuos sobre áreas dispuestas ya clausuradas (colocar basura sobre basura) con el propósito de no extender más el predio intervenido y no afectar los predios aledaños, que como ya se ha identificado, son de vocación agrícola, por eso la importancia de realizar estos ensayos geofísicos para plasmar otras alternativas urbanísticas para el uso de estos suelos clausurados que sean más amigables con el medio ambiente y el entorno.

Con la utilización de los resultados obtenidos en la aplicación de estos métodos geofísicos a zonas clausuradas de rellenos sanitarios podemos determinar la caracterización dinámica del suelo y contrastarlo con los requerimientos que establece la norma sísmo resistente Colombiana NSR-10, y así poder utilizar el recurso suelo y su destinación en pro del beneficio de la comunidad.

Hechas las consideraciones anteriores, con este trabajo se pretende revisar y analizar los datos geofísicos obtenidos en la caracterización del subsuelo en los ensayos realizados al relleno sanitario La Cortada, utilizando la combinación de los métodos geofísicos y geoelectrónicos ya que su fusión ha demostrado gran éxito para obtener el máximo de información y contrastarlos con la norma NSR-10. Los métodos geoelectrónicos serán adquiridos a partir de sondeos eléctricos verticales, permitiendo obtener tomografías geoelectrónicas más profundas y sin pérdidas de datos por niveles de profundidad. Y así poder dar un concepto técnico para el uso del recurso suelo de estas zonas clausuradas.

1.2 Objetivo General

Revisar los métodos geofísicos aplicados a rellenos sanitarios en zonas clausuradas para el aprovechamiento del suelo, identificando las propiedades geofísicas y geotécnicas necesarias para la implementación de obras civiles soportadas bajo la norma NSR-10.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Recopilar la información de toma de datos geofísicos de los modelamientos realizados en las zonas clausuradas del relleno sanitario.
- Verificar los datos geofísicos adquiridos por los métodos de refracción sísmica y el MASW (análisis multicanal de ondas superficiales).
- Contrastar los resultados adquiridos de caracterización y factores dinámicos del suelo con la NSR-10 Colombiana.
- Brindar el concepto técnico para la implementación de infraestructura de obra civil para esas zonas de aprovechamiento.

Capítulo 2

Descripción de la zona de estudio

A continuación, se presenta las características geográficas, operativas y geológicas más relevantes del relleno sanitario La Cortada con el propósito de facilitar la comprensión de la realidad actual de la zona de interés.

2.1 Marco Geográfico

El municipio de Pamplona, se encuentra a una altura promedio de 2.200 metros sobre el nivel del mar. Está localizada a 60 kilómetros en línea recta de la ciudad de Cúcuta capital del departamento de Norte de Santander y a 348 kilómetros de Bogotá D.C. Su territorio cuenta con una extensión de 1.176 kilómetros cuadrados y su temperatura promedio de 14 grados centígrados. Su densidad poblaciones es de 59.422 habitantes

Limita al norte con Pamplonita, al sur con Cácuta y Chitagá, al oriente con Labateca y al occidente con Cucutilla. Está conectada por carreteras nacionales con las ciudades de Cúcuta, Bucaramanga, Bogotá y Arauca. (Alcandía 2020).

2.1.1 Localización

El relleno sanitario La Cortada está ubicado en la parte alta de la vereda Chíchira del municipio de Pamplona, a una distancia de 3.5 kilómetros por la vía pavimentada Pamplona-Chitagá, con coordenadas de ubicación 1.166.400 mE y 1.306.600 mN. Sistema de coordenadas MAGNA, origen central a una altura promedio de 2380 metros sobre el nivel del mar, la zona clausurada abarca un área aproximada de 3645 metros cuadrados. (Revista UIS Ingenierías, Propuesta Urbanística para el aprovechamiento del recurso suelo en zonas clausuradas en el relleno sanitario del municipio de Pamplona, Norte de Santander mediante técnicas geofísicas, J. Acuña, A. Hernandez y L. Pabon).

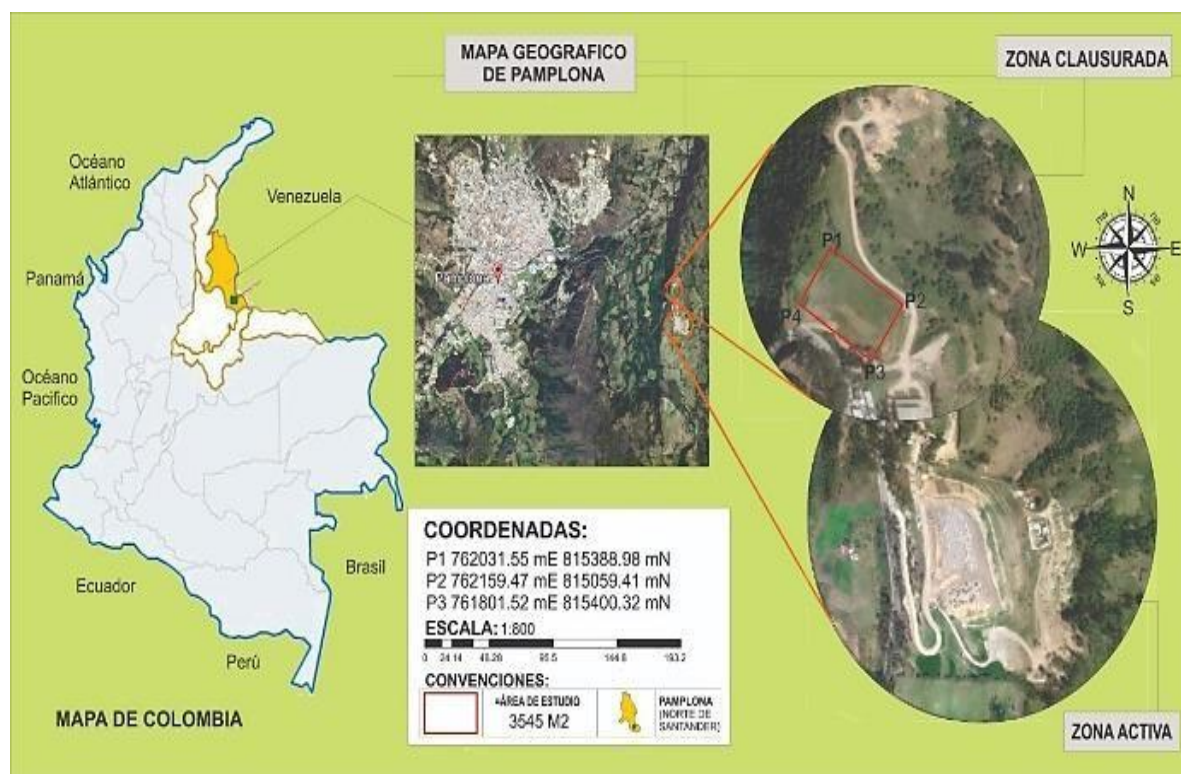


Figura 2-1. Mapa de localización de zona de estudio RS La Cortada

Fuente: Revista UIS Ingenierías, Propuesta Urbanística para el aprovechamiento del recurso suelo en zonas clausuradas en el relleno sanitario del municipio de Pamplona, Norte de Santander mediante técnicas geofísicas, J. Acuña, A. Hernandez y L. Pabón.

2.2 Marco Conceptual

El relleno sanitario La Cortada administrado por la Empresa de Servicios Públicos de Pamplona (Empopamplona) es el centro de disposición final de la ciudad de Pamplona y se ha convertido en la solución a los problemas de las basuras de ocho municipios de la provincia y de Betas (Santander). Funciona en un predio de 18 hectáreas en donde solamente cinco de ellas se utilizan para la disposición final de los residuos sólidos. El resto los componen áreas de compensación ambiental en donde hay bosques nativos que aíslan las actividades que se cumplen en el relleno sanitario.

De los municipios de la región, incluyendo a Pamplona, mensualmente se depositan allí 1.500 toneladas de residuos sólidos. Esto significa que diariamente los vehículos compactadores llevan 50 toneladas diarias de las cuales el 90 por ciento corresponde a Pamplona y las restantes de los municipios de la provincia como son Silos, Mutiscua, Cárcota, Chitagá, Toledo, Labateca, Cucutilla y Betas (Santander).

El objetivo central de este centro de disposición final es el de administrar, operar y mantener integralmente, a partir de procesos tales como el arrastre, distribución, disgregación y compactación, los residuos sólidos y lixiviados allí depositados, con la alternativa de tratamiento y aprovechamiento de los mismos. (Empopamplona 2020).

2.3 Marco Geológico

La geología local de la zona de estudio se encuentra documentada bajo estudios realizados por la universidad Industrial de Santander, Universidad de Pamplona y el Servicio Geológico Colombiano, los cuales contienen material referente a la formación geológica de Pamplona de un modo general y a la estabilidad de taludes del relleno sanitario de La Cortada de manera específica.

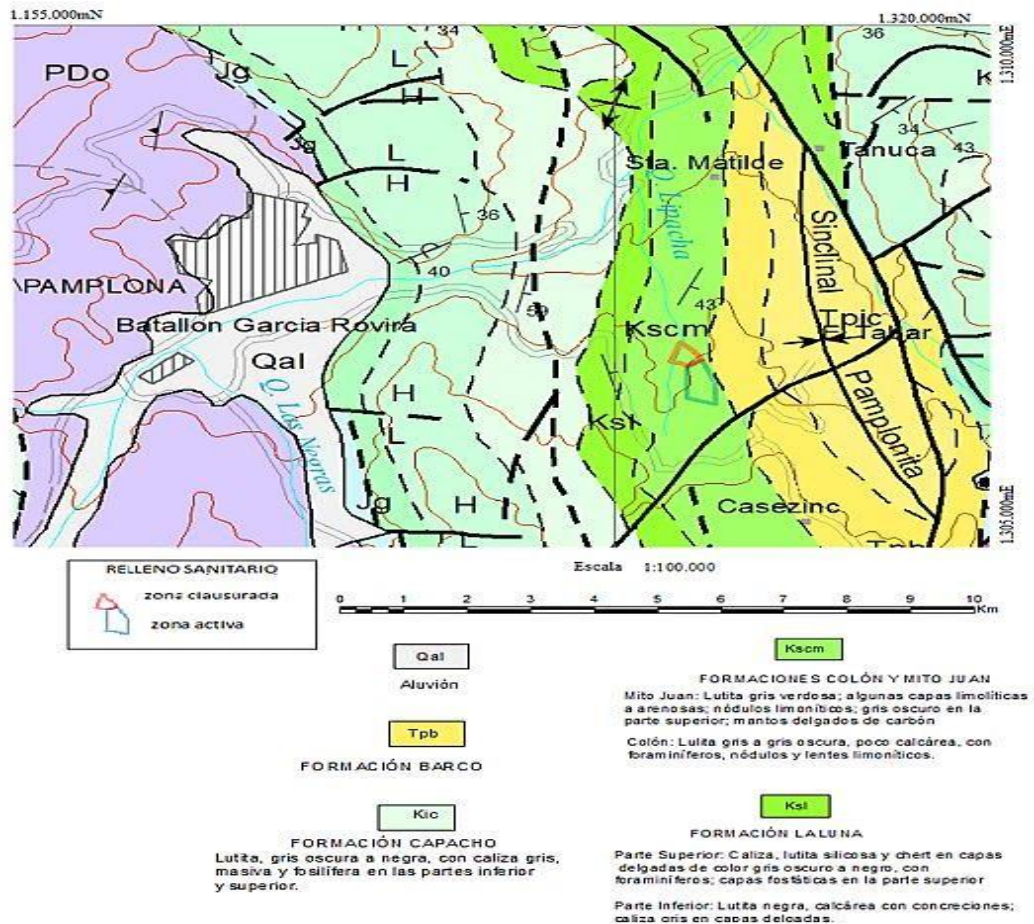


Figura 2-2. Descripción geológica de la zona de estudio

Fuente: Mapa geológico del cuadrante H13 correspondiente al Municipio de Pamplona INGEOMINAS, 1977

En la zona de estudio se identifican dos tipos de suelos como se muestra en la imagen anterior, los cuales son formación la luna y formaciones colón - mito Juan, donde para el primer estrato está compuesto por calizas y lodolitas calcáreas con grandes concreciones y nódulos discoidales, biomicríticos, capas delgadas de chert y rocas fosfóricas en la parte alta de la secuencia, La formación La luna descansa concordantemente sobre la formación Capacho e infrayace en contacto aparentemente normal a la formación Colón-Mito Juan. Esta unidad se correlaciona con la formación La Luna del sector occidental de Venezuela y del Valle Medio del Magdalena. El espesor varía de 50 a 300 m.

Para el segundo estrato, consta de lodolitas grises, gris oscuras a negras, fosilíferas (foraminíferos), levemente calcáreas, piritosas, con nódulos ferruginosos y algunas capas de calizas grises, lumaquélidas. El espesor varía de 125 a 645 m. (Revista UIS Ingenierías, Propuesta Urbanística para el aprovechamiento del recurso suelo en zonas clausuradas en el relleno sanitario del municipio de Pamplona, Norte de Santander mediante técnicas geofísicas, J. Acuña, A. Hernandez y L. Pabon).

Capítulo 3

Marco Teórico

El objeto de este análisis se centrará en los resultados de los modelos geofísicos y geoelectrónicos aplicados a la zona clausurada del relleno sanitario La Cortada en los aspectos de clasificación del subsuelo como medio de abordaje hacia la geotecnia y su implementación en la ingeniería civil, contrastados éstos con los factores dinámicos provistos por la NSR-10 Colombiana. Por tal razón será necesario plantear algunos parámetros teóricos que sirvan de guía conceptual en el avance de esta investigación.

3.1 Métodos geofísicos aplicados a las zonas del relleno sanitario

En el relleno sanitario se ha venido realizando estudios geofísicos con el fin de caracterizar el suelo en las zonas clausuradas y operativas por medio de los métodos de refracción sísmica y MASW (método de análisis multicanal de ondas superficiales).

La refracción sísmica está basada en el análisis de energía de las vibraciones después de iniciado el movimiento del suelo, concentrándose específicamente en los terrenos inducidos por la reflexión de las ondas, en las diferentes interfaces de capas, que han sido generadas en lugar puntual.

El MASW es una técnica geofísica que se puede usar como sustitutiva de la sísmica de refracción en zonas urbanas y en aquellos lugares donde el nivel de ruido impida la utilización de la sísmica de refracción convencional. También es muy útil en la auscultación de asentamientos diferenciales del terreno en edificaciones. Y combinada con la sísmica de refracción proporciona los módulos de elasticidad dinámicos del terreno. Es muy útil para la definición de conceptos técnicos y constructivos en cimentaciones.

3.2 Caracterización de suelos

Para la caracterización de suelos desde el punto de vista sísmico es importante conocer los perfiles de velocidad V_s , de las capas de subsuelo que subyacen el terreno, hasta una profundidad de al menos 30 metros; el perfil de velocidades en los primeros 30 metros de profundidad resulta necesario para:

- Evaluar la respuesta sísmica del terreno donde se va a realizar una construcción.
- Evaluar potenciales de licuación de suelos en un terreno (cuando se encuentren arenas).
- Evaluar la transmisión de vibraciones generadas por explosiones, máquinas u otros elementos en superficie o profundidad.
- Utilizando el perfil de velocidad de onda de corte V_s , en los primeros 30 metros de profundidad es posible determinar una velocidad equivalente V_{s30} pudiéndose caracterizar el terreno de manera global.

Las velocidades de onda de corte asociadas a los diferentes tipos de suelos son las siguientes:

Tipo de Suelo	V_s (m/s)
Roca	V _s > 1000
Grava	V _s > 700
Arena Densa	700 > V _s > 500
Arena Suelta	500 > V _s > 400
Suelo Fino Consistente	400 > V _s > 200
Suelo Fino Blando	200 > V _s > 80

Tabla 3-1. Velocidades de Onda Asociadas a los diferentes tipos de Suelos
Fuente: OCHOA, Felipe. Caracterización geotécnica de suelos 1991

3.3 Parámetros dinámicos del subsuelo

Las constantes elásticas, conocidas también como módulos elásticos, juegan un papel fundamental a la hora de caracterizar los suelos. Estas constantes son importantes en la sismología debido a que la velocidad de las ondas sísmicas depende de las mismas y de la densidad de la roca. Así mismo, son empleadas para la caracterización de sitios en la geotecnia aplicada a ingeniería civil, por lo cual su investigación y cuantificación a través de los métodos geofísicos resulta un área de aplicación interesante y permite ampliar los alcances de la geofísica de los ambientes urbanos. (ROJAS, Simón Antonio. Sísmica de Refracción y de Microtremores para caracterización de parámetros dinámicos superficiales. 2008).

Las constantes elásticas más comunes son:

3.3.1 Módulo de Volumen (compresibilidad volumétrica) (k): Mide la resistencia de un material a la compresión uniforme y está definido como el aumento de presión que causa la disminución relativa del volumen.

$$K = -V \frac{\partial p}{\partial v}$$

Donde p es la presión, V el volumen y Δ son los cambio respectivamente.

3.3.2 Módulo de Young (E): Determinado como la relación entre el esfuerzo uniaxial y la deformación uniaxial, proporcionando el valor de rigidez de un material elástico isotrópico.

$$E = 2G(1 + \nu)$$

3.3.3 Módulo de cizalla (rigidez) (G): Tasa de esfuerzo cortante a deformación cortante para un material y detalla el comportamiento del mismo ante un esfuerzo de corte. La velocidad Vs está controlada por el módulo de cizalla

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

3.3.4 Coeficiente de Poisson (ν): Tasa de deformación compresiva (normal aplicada a la carga) a la carga axial (paralela a la carga).

Suponiendo que el material es comprimido a lo largo de la dirección axial:

$$v = -\frac{\varepsilon x}{\varepsilon y}$$

Y en función de las velocidades sísmicas:

$$v = \frac{\left(\frac{vp}{vs}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{vp}{vs}\right)^2 - 2}$$

3.3.5 Capacidad de carga: Es la capacidad que tiene el terreno de soportar los esfuerzos que se aplican. Es la presión de contacto promedio máxima entre el cimiento y el suelo que no debe producir fallas de corte último.

$$qa = 2.4 (10^{-4})\rho Vs$$

3.4 Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas consisten en un paquete de energía elástica de deformación que viaja desde la fuente sísmica hasta el subsuelo a velocidades que dependen del módulo de elasticidad y densidades en el medio en el cual viajan. El material se mantiene o no dentro del rango elástico dependiendo de factores como la magnitud y orientación del esfuerzo y el tiempo al cual es sometido el material.

3.5 Tipos de ondas sísmicas

Existen dos tipos principales de ondas sísmicas; aquellas que viajan a través del medio propiamente dicho, llamadas ondas de cuerpo, y aquellas que viajan a lo largo de las interfaces, llamadas ondas de superficies. Para nuestro caso de estudio denotaremos las ondas de cuerpo.

3.5.1 Ondas sísmicas corporales: Son ondas elásticas que se propagan en el interior de la tierra. En prospección de reflexión y refracción, las ondas corporales son la fuente de información usada para representar el interior de la tierra, debido a la propagación en todas las direcciones lejos de la fuente. Las ondas corporales se pueden dividir en dos clases: Ondas P y Ondas S.

3.5.1.1 Ondas P: También llamadas longitudinales, primarias, de compresión o empuje. La generación de este tipo de ondas es a partir de oscilación de las partículas del suelo, por compresión y dilatación, con respecto a puntos fijos en la dirección de propagación, se propagan en el medio más rápido que los otros tipos de ondas, las partículas que constituyen el medio son desplazadas en la misma dirección que la propagación de la onda. Las ondas P son análogas a las ondas sonoras que propagan en el aire.

3.5.1.2 Ondas S: Conocidas también como ondas transversales secundarias o de corte. El movimiento de partículas en este caso ocurre perpendicular a la dirección de propagación por efecto de esfuerzo de corte. Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. Su velocidad es alrededor de 58% de la de una onda P para cualquier material sólido.

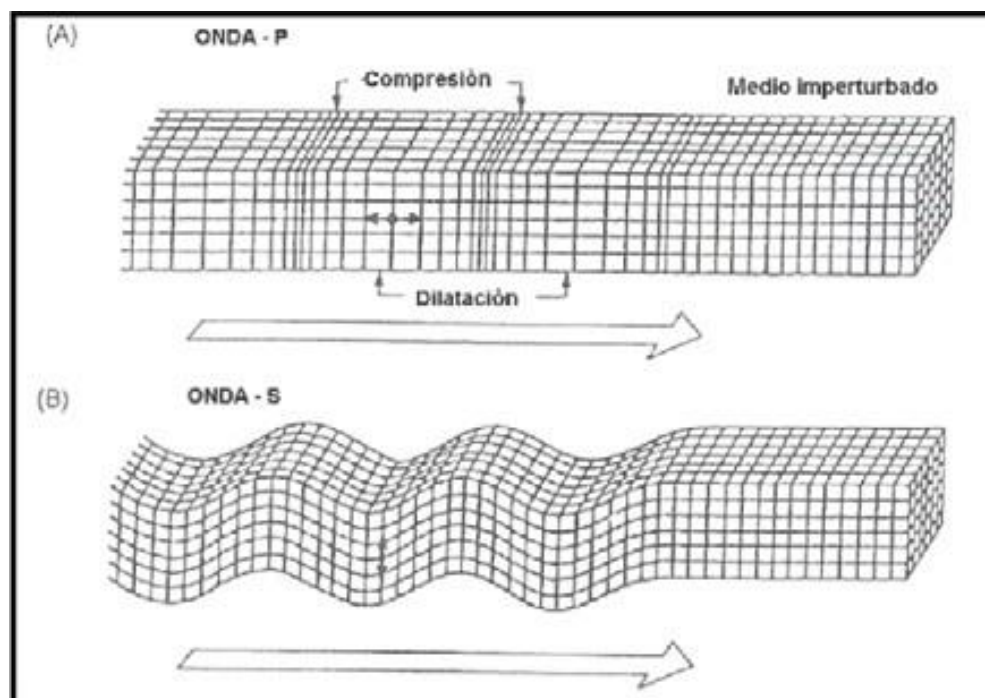


Figura 3-1. Modelo de propagación de ondas P(A) y ondas S(B)

Fuente: VÁSQUEZ PAREDES, Thaina Thamesis. Aplicación de los métodos sísmicos: vibraciones naturales y microtremores para caracterización de sitio en estudios e Ingeniería civil. Informe de Pasantía para optar el título de Ingeniero Geofísico. Sartenejas, Baruta: Universidad Simón Bolívar. Decanato de Estudios Profesionales, Coordinación de Ingeniería Geofísica. 2008

Capítulo 4

Resultados obtenidos en los modelamientos aplicados a zonas activas y clausuradas del relleno sanitario por medio de métodos geofísicos.

Los resultados recopilados en esta investigación sobre la aplicación de métodos geofísicos en zonas clausuradas de RS, obedece a los realizados en el relleno sanitario La Cortada, municipio de Pamplona, Norte de Santander. Donde se llevaron a cabo tres modelamientos por parte estudiantes que realizaron su trabajo de grado para la obtención del título profesional en las áreas de Física e Ingeniería Civil de la Universidad de Pamplona.

4.1 Modelamientos realizados a las zonas del relleno sanitario

4.1.1 Primer Modelamiento



Figura 4-1 Localización de las 7 líneas adquiridas para el estudio
Fuente: Yarnier David Hinojosa Carvajal

4.1.1.1 Título de investigación:

Aplicación de métodos geoelectricos en zonas clausuradas y activas del relleno sanitario regional “La Cortada” municipio de Pamplona, Norte de Santander (2017)

4.1.1.2 Métodos Aplicados

- Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

4.1.1.3 Resultados

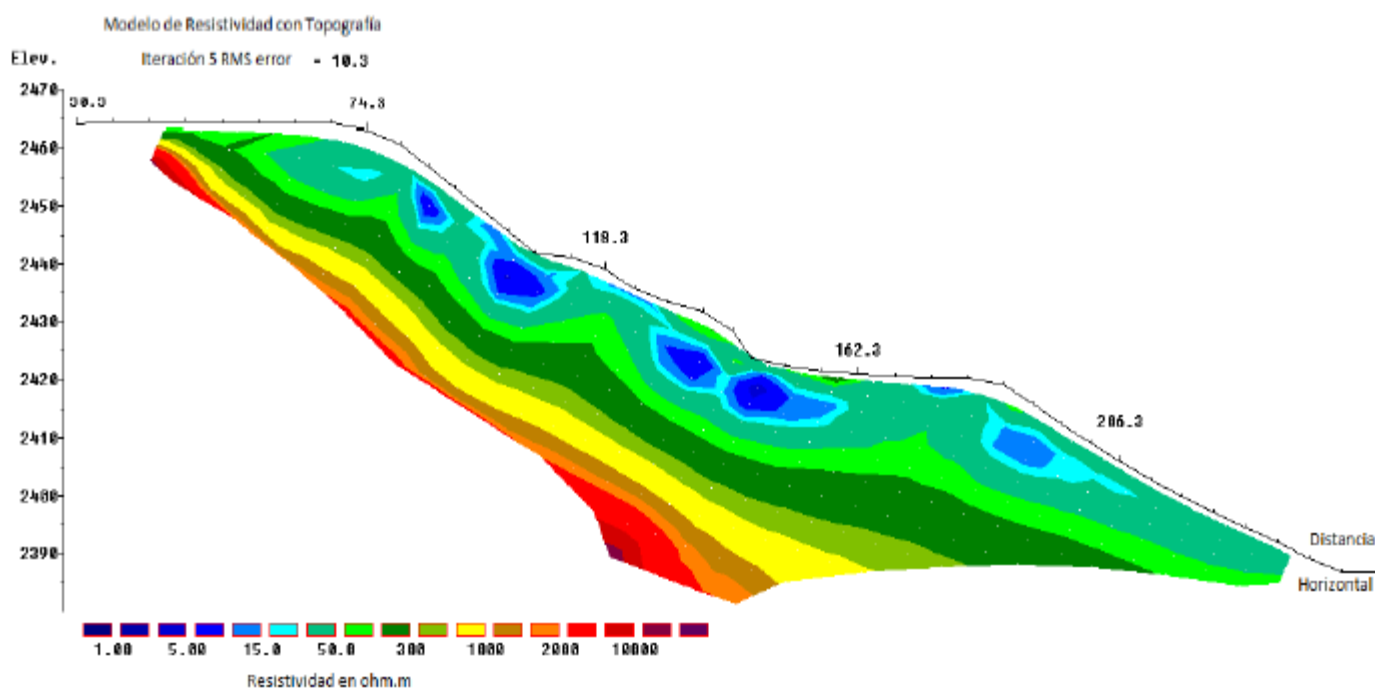


Figura 4-2 Tomografía línea 2
Fuente: Yarnier David Hinojosa Carvajal

TRE	Resistividad Mínima (Ohm.m)	Resistividad Máxima (Ohm.m)
Línea 1	0.735	5328
Línea 2	2.91	3812
Línea 3	60.9	41010
Línea 4	8.57	2105
Línea 5	4.3	440.8
Línea 6	0.513	1561
Línea 7	2.76	492

Figura 4-3 Resultados de resistividad para las líneas adquiridas para el estudio
Fuente: Yarnier David Hinojosa Carvajal

4.1.2 Segundo Modelamiento

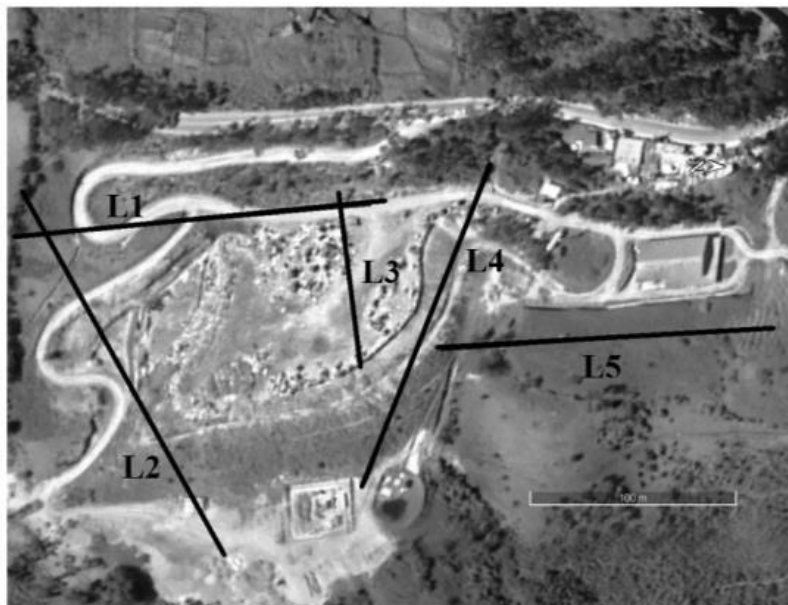


Figura 4-4 Localización de las 5 líneas adquiridas para el estudio
Fuente: Publicación revista ambiental Agua, Aire y Suelo. 2017

4.1.2.1 Título de investigación:

Métodos Geofísicos aplicados a las celdas activas y clausuradas del relleno sanitario “La Cortada” (Pamplona, Norte de Santander) 2017.

4.1.2.2 Métodos Aplicados

- Tomografía de Refracción Sísmica (TRS) y la
- Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

4.1.2.3 Resumen

A partir de estas técnicas se pueden determinar algunas propiedades como la resistividad eléctrica y la velocidad sísmica tipo P. El objetivo de este estudio fue identificar o delimitar la geometría del relleno sanitario específicamente de la zona de contacto entre los materiales de desecho y la roca fresca. Se adquirieron datos para 5 líneas de TRS, y 5 líneas de TRE en zonas activas y clausuradas del relleno sanitario. Este trabajo abarcó etapas de diseño, adquisición, procesamiento e interpretación de estos datos geofísicos.

4.1.2.4 Resultados



Figura 4-5 Distribución de las 5 líneas en zonas activa y clausurada
Fuente: Publicación revista ambiental Agua, Aire y Suelo. 2017

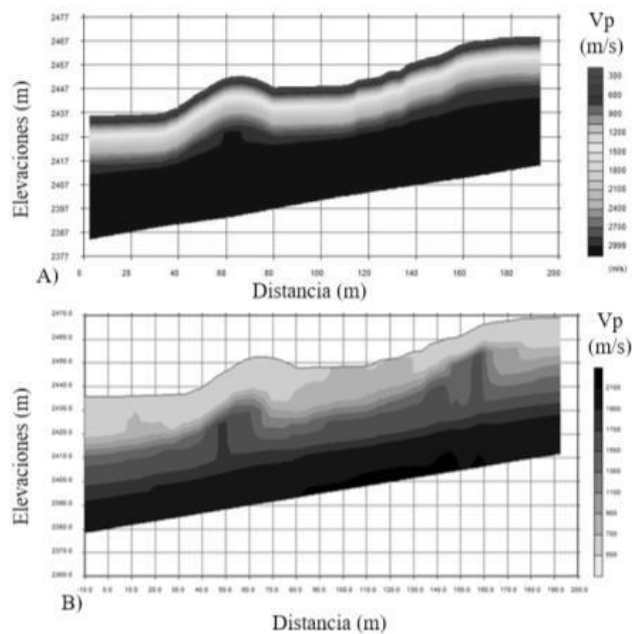


Figura 4-6 A) Modelo inicial propuesto para la línea L2 de TRS velocidades de onda P entre 300 y 3000 m/s y B) Modelo Final producto de la Tomografía resultando valores de velocidad de onda P entre 500 m/s y 2250 m/s.

Fuente: Publicación revista ambiental Agua, Aire y Suelo. 2017

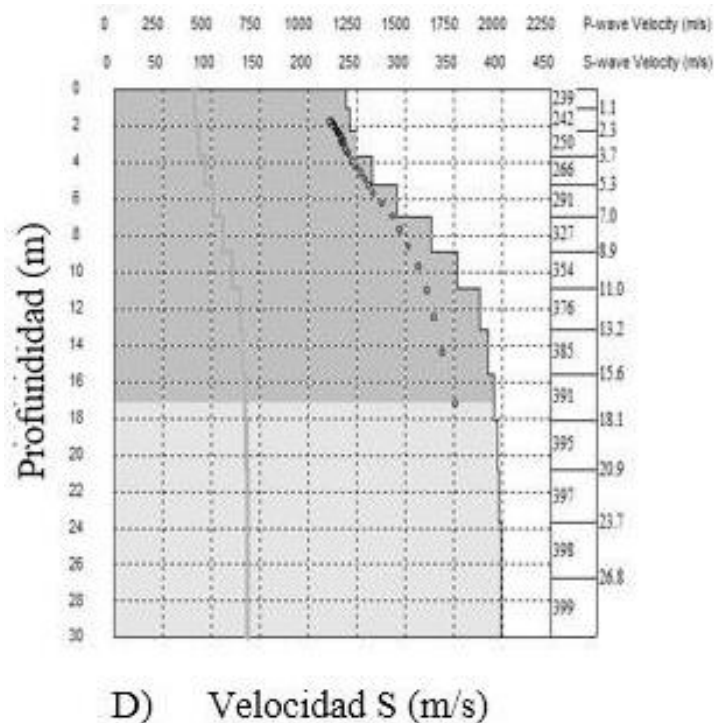


Figura 4-7 Flujo de Procesamiento de MASW en la línea L2 D) Perfil de Onda S.
Fuente: Publicación revista ambiental Agua, Aire y Suelo. 2017

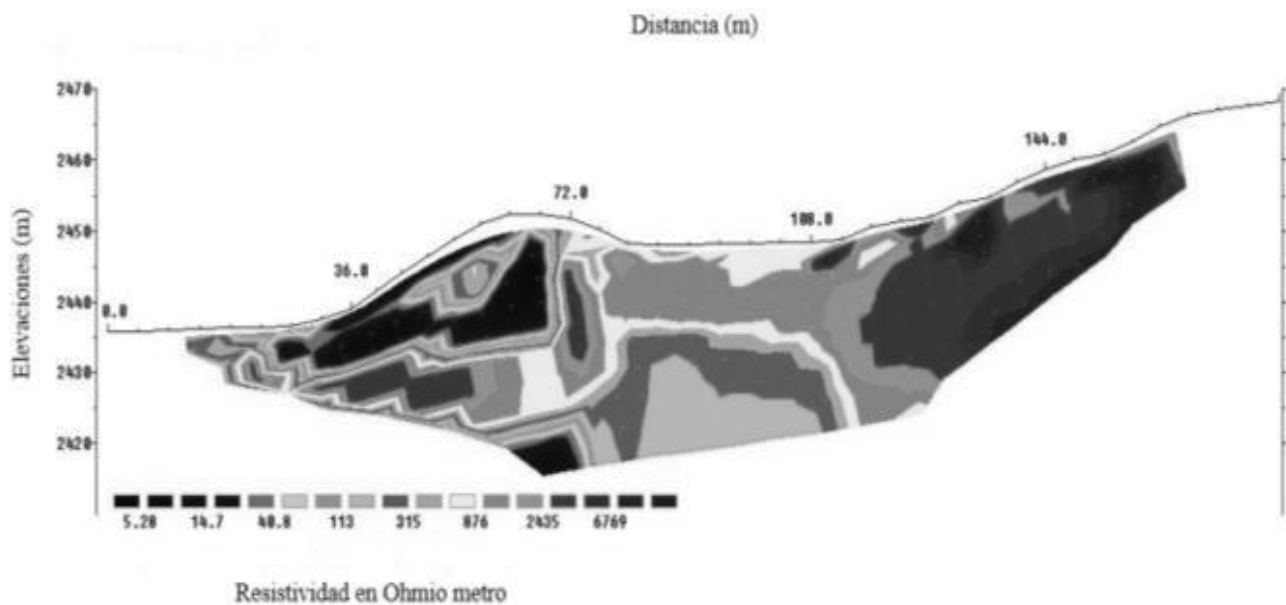


Figura 4-8 Sección de resistividades reales obtenida para la L2 incluyendo topografía
Fuente: Publicación revista ambiental Agua, Aire y Suelo. 2017

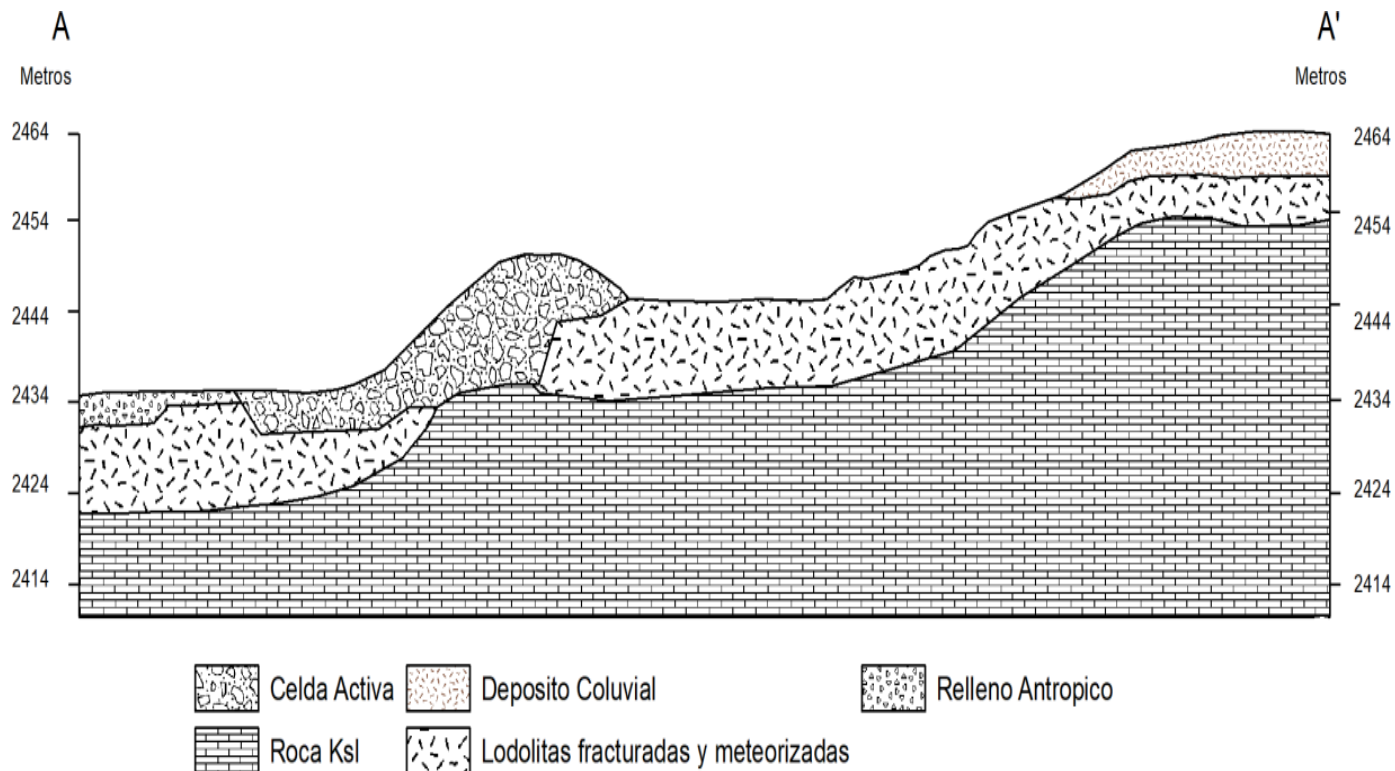


Figura 4-9 Modelo final resultado de la integración de los datos geofísicos para la línea L2 incluyendo la topografía.

Fuente: Publicación revista ambiental Agua, Aire y Suelo. 2017

Línea	VP (m/s)	VS (m/s)	ρ (Ω m)
L1	804-3000	200-650	119-8548
L2	518-2062	239-39	5.28-6769
L3	200-384	60-75	10.1-1114
L4	793-1608	177-266	6.9-7310
L5	407-711	177-300	10.2-3613

Tabla 4-1 Rango de valores obtenidos para todas las líneas en la zona de estudio

Fuente: Publicación revista ambiental Agua, Aire y Suelo. 2017

4.1.3 Tercer Modelamiento

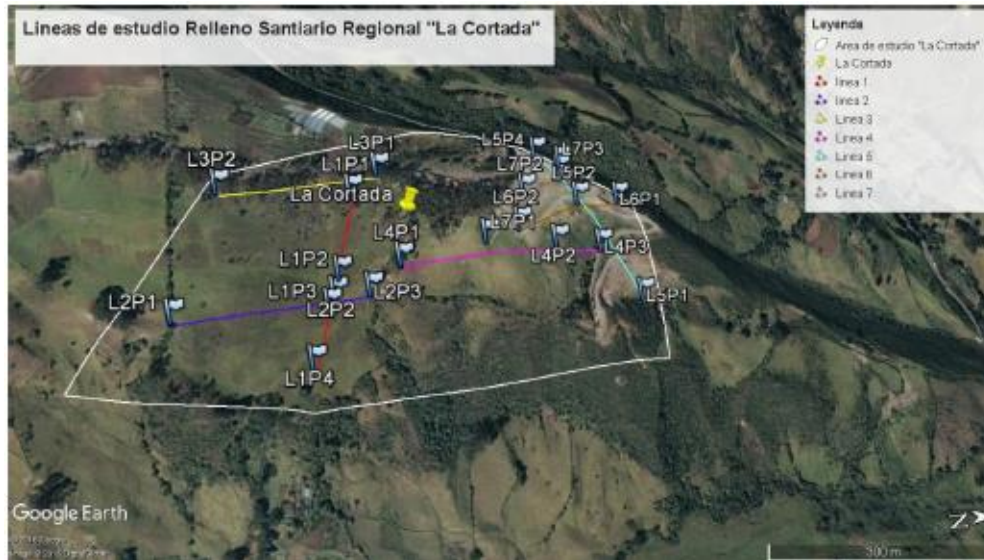


Figura 4-10 Localización de las 7 líneas adquiridas para el estudio
Fuente: Hernán Mancilla

4.1.3.1 Título de investigación:

Caracterización Geofísica de las zonas clausuradas y en operación, en las instalaciones del relleno sanitario regional “La Cortada” municipio de Pamplona, Norte de Santander, a partir de la aplicación de TRS y MASW. 2017.

4.1.3.2 Métodos Aplicados

- Tomografía de Refracción Sísmica (TRS)
- Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

4.1.3.3 Resultados

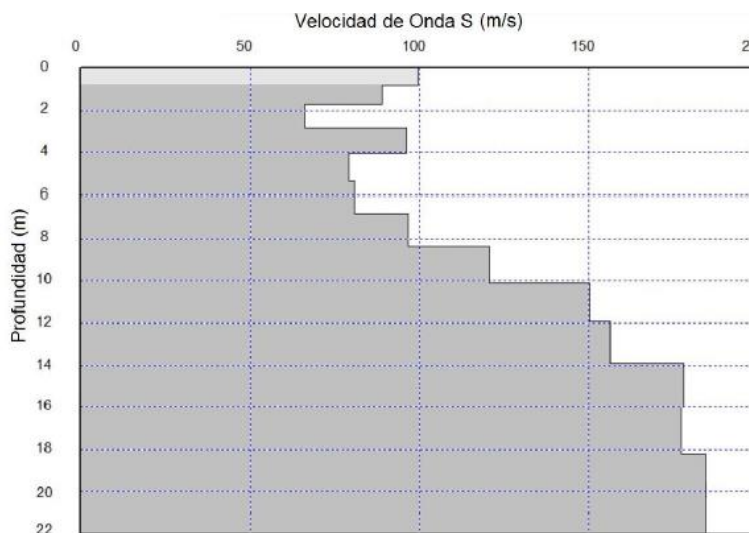
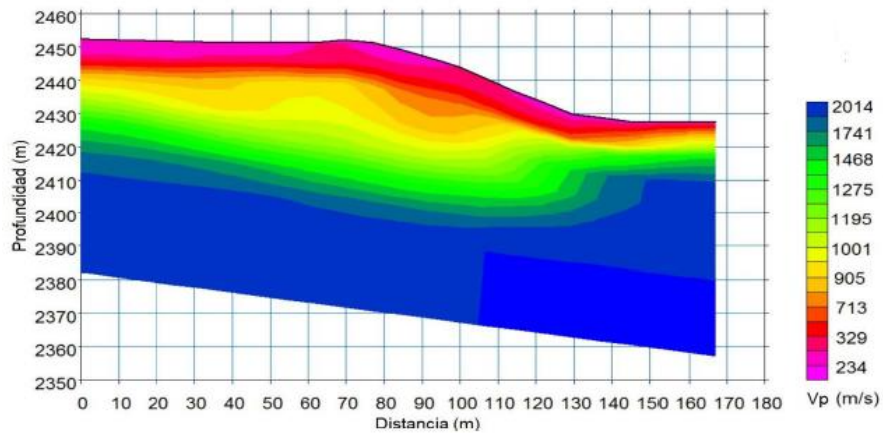
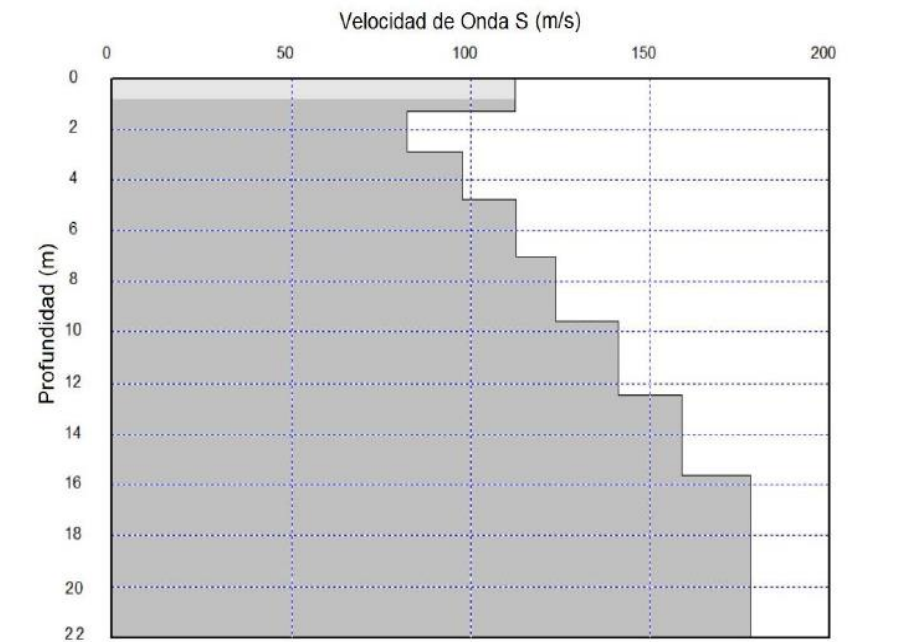
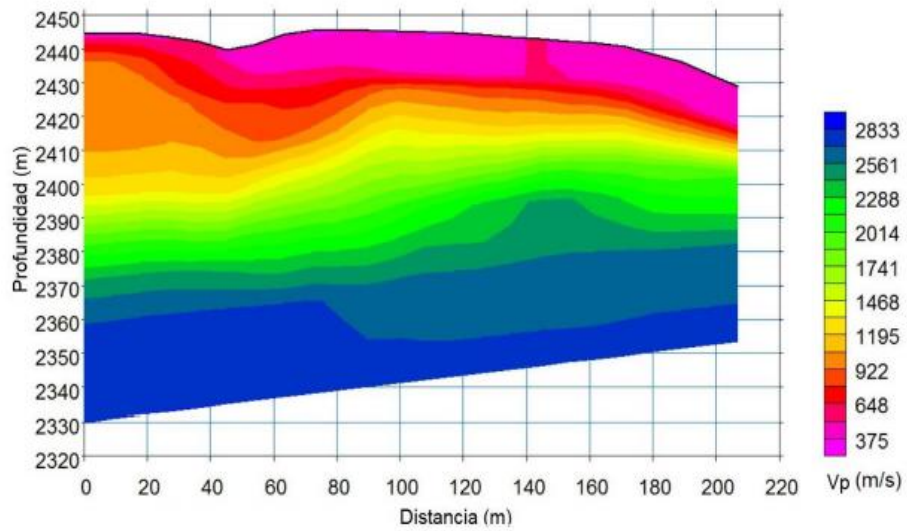


Tabla 9. Descripción de la línea 1.

Capas	Descripción	Espesores			Vp (m/s)	Vs (m/s)
		0,0 m	83,5 m	167 m		
1	Celda 4. Residuos solidos	4,60	3,90	-	233-244	63-99
2	Celda 1-2-3 respectivamente. Residuos solidos	2,80	17,00	-	244-890	78-182
3	Base del relleno	-	-	-	890-2015	-

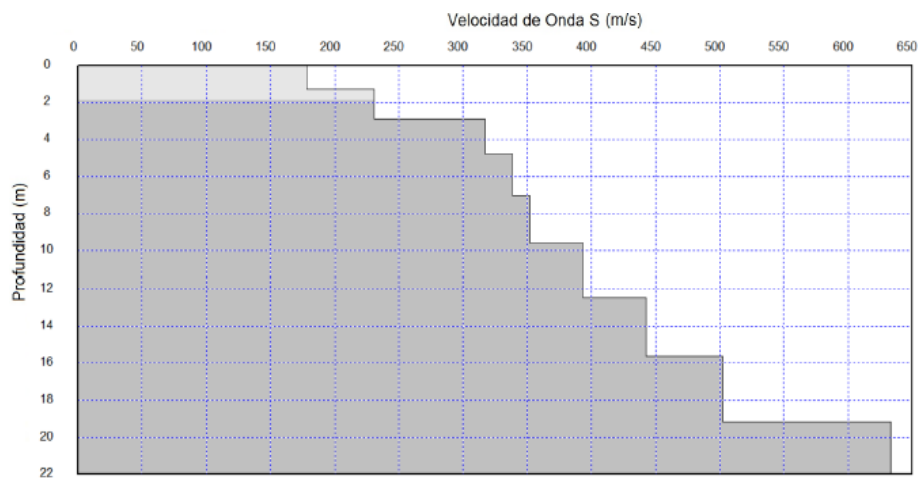
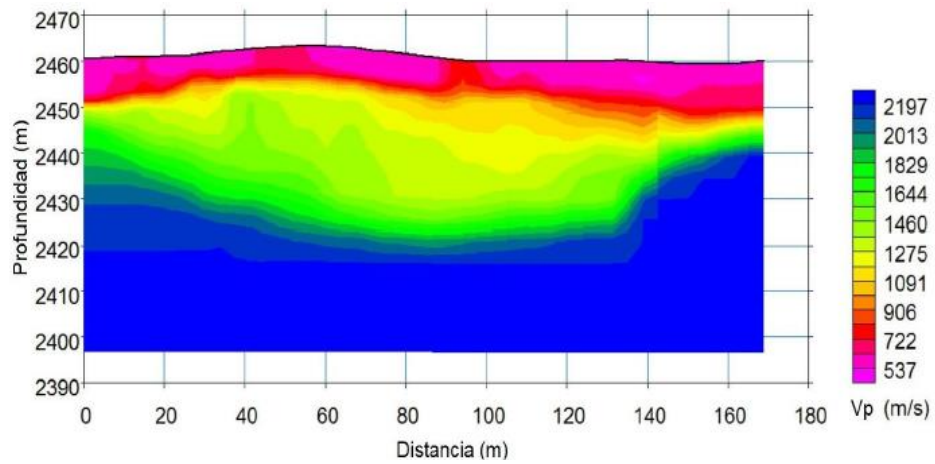
Fuente: Autor.

Figura 4-11 Resultados ondas Vp y Vs línea 1
Fuente: Hernán Mancilla



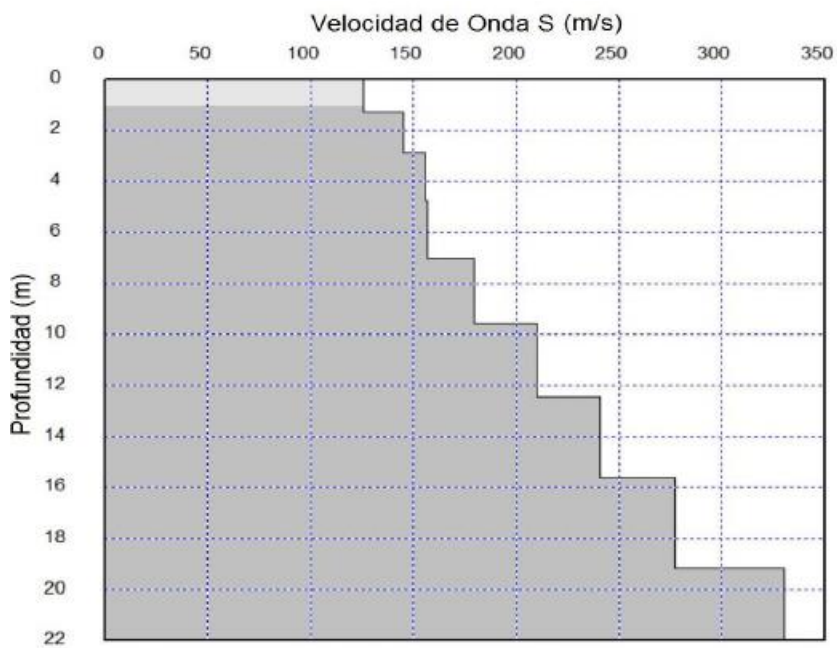
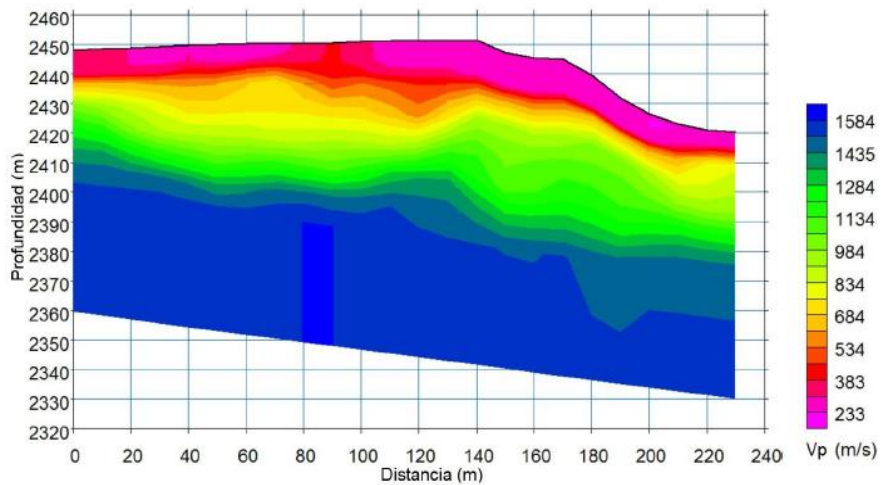
Capas	Descripción	Espesores			Vp (m/s)	Vs (m/s)
		0,0 m	103,5 m	207 m		
1	Celdas Residuos solidos	-	14,90	12,60	375-870	83-158
2	Base del relleno	-	-	-	870-2833	-

Figura 4-12 Resultados ondas Vp y Vs línea 2
Fuente: Hernán Mancilla



Capas	Descripción	Espesores			Vp (m/s)	Vs (m/s)
		0,0	84,5	169		
		m	m	m		
1		7,70	5,90	4,60	537-605	178-340
2		1,80	2,20	6,70	605-910	340-352
3		10,30	30,7	6,50	910-1910	352-635
4		-	-	-	1910-1997	-

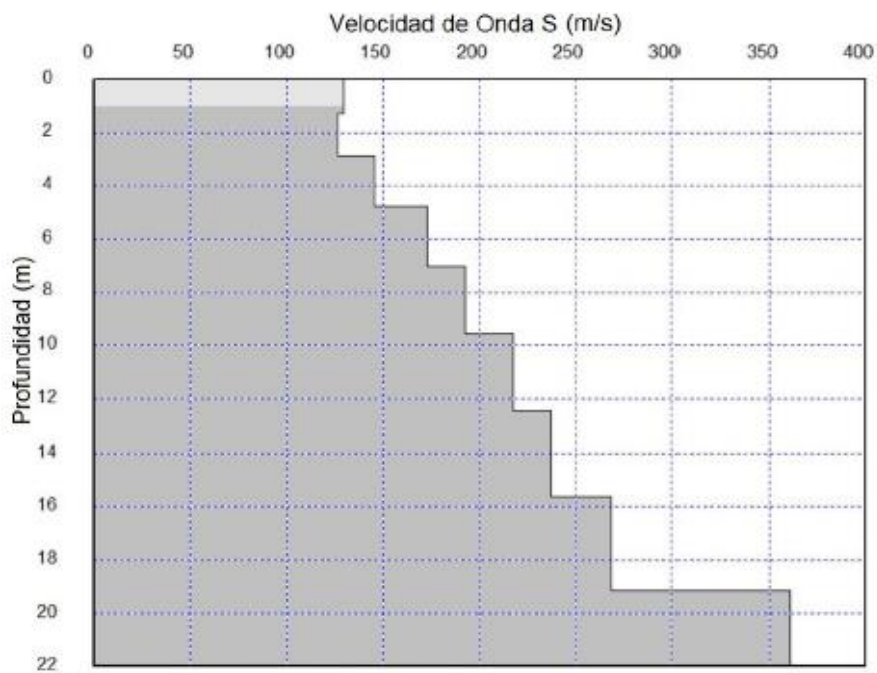
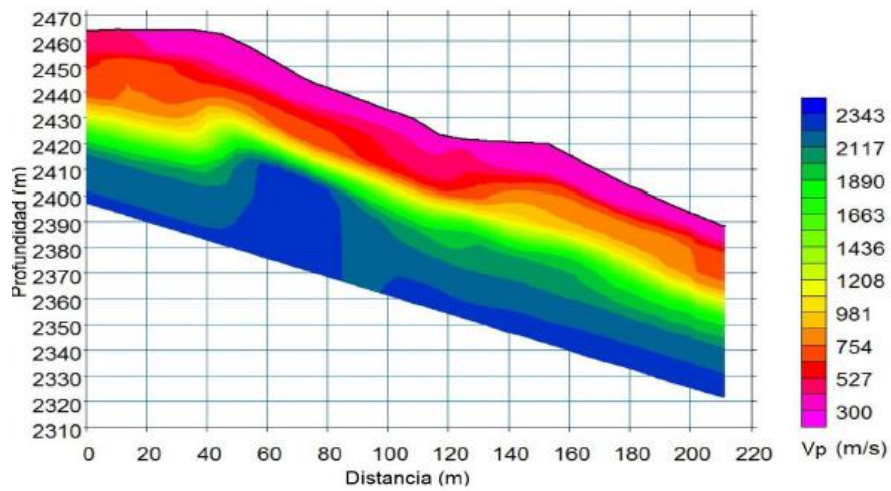
Figura 4-13 Resultados ondas Vp y Vs línea 3
Fuente: Hernán Mancilla



Capas	Descripción	Espesores			Vp (m/s)	Vs (m/s)
		0,0 m	115 m	230 m		
1	Celdas Residuos solidos	15,50	32,20	13,50	233-850	125-337
2	Base del relleno	-	-	-	850-1584	-

Fuente: Autor.

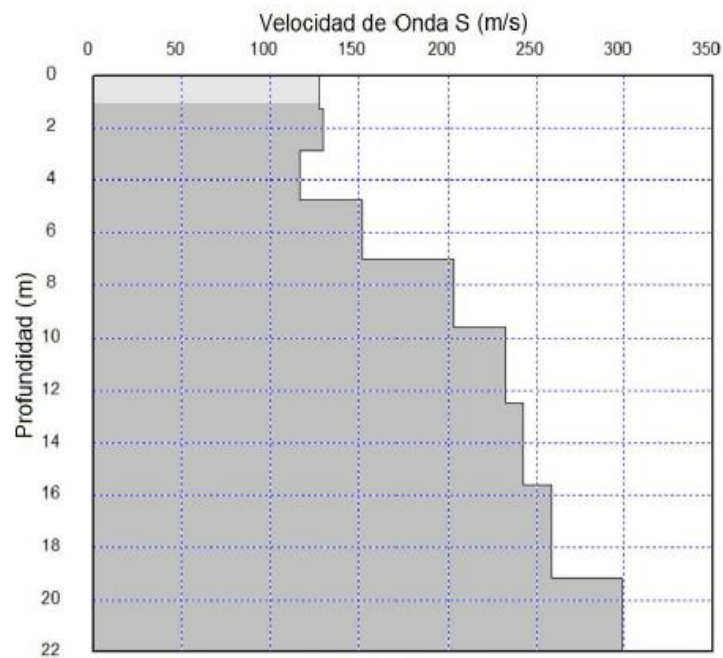
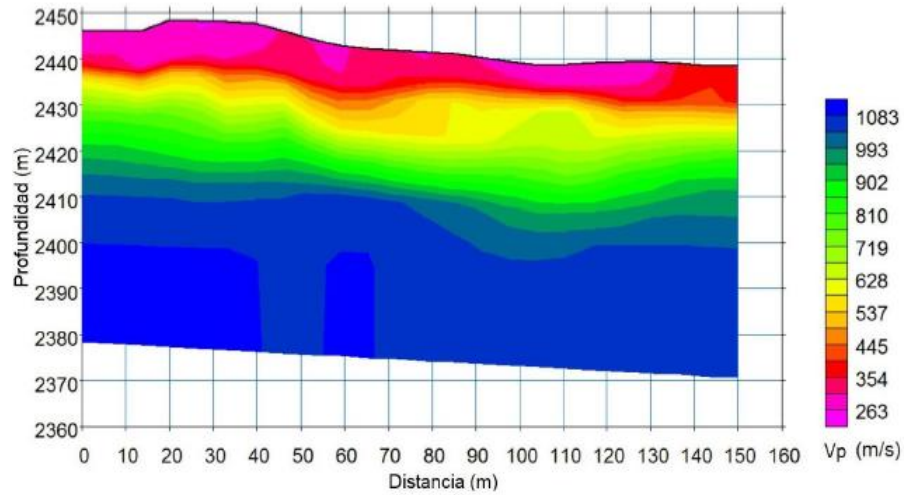
Figura 4-14 Resultados ondas Vp y Vs línea 4
Fuente: Hernán Mancilla



Capas	Descripción	Espesores			Vp (m/s)	Vs (m/s)
		0,0 m	105,5 m	211 m		
1	Celdas Residuos solidos	19,60	26,40	23,8	300-870	127-361
2	Base del relleno	-	-	-	870-2343	-

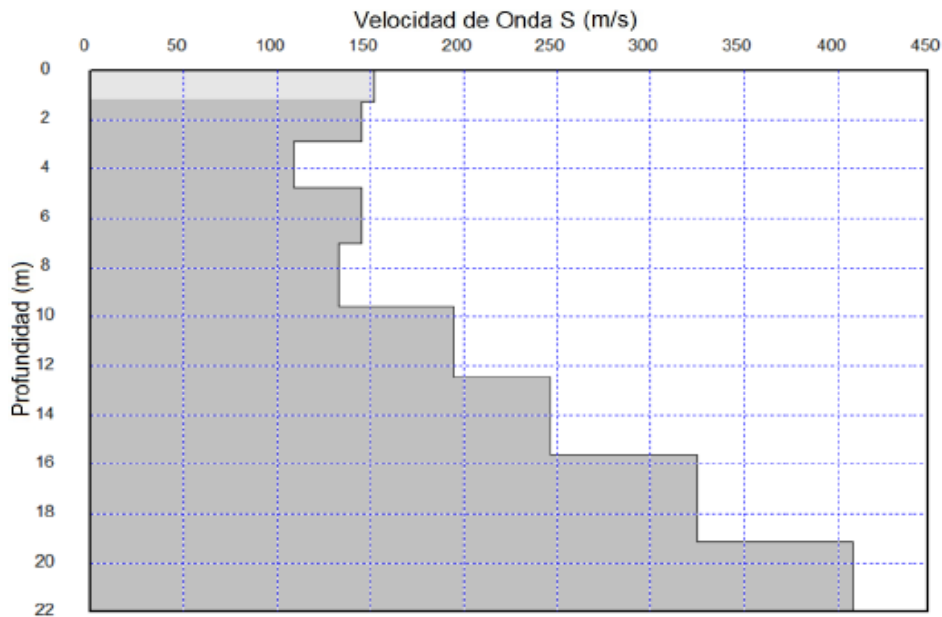
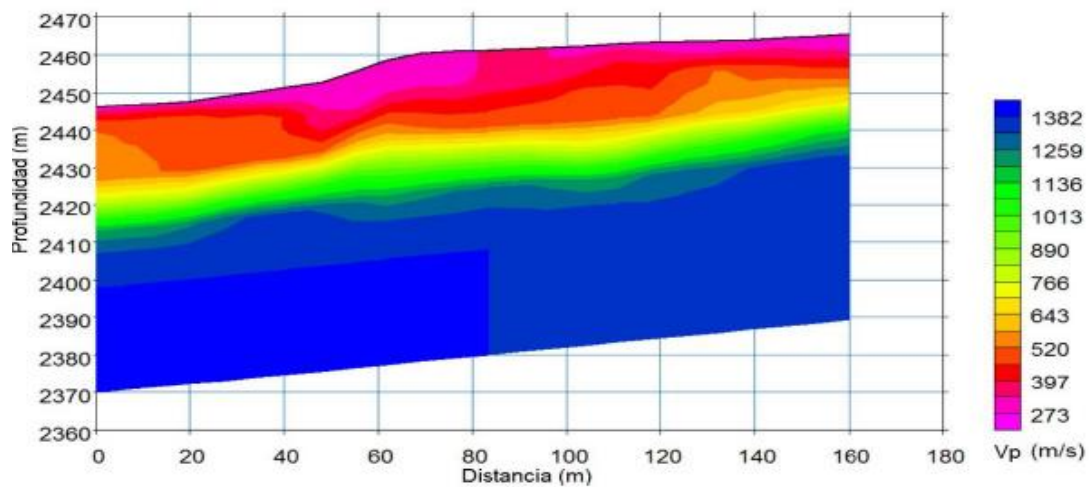
Fuente: Autor.

Figura 4-15 Resultados ondas Vp y Vs línea 5
Fuente: Hernán Mancilla



Capas	Descripción	Espesores			Vp (m/s)	Vs (m/s)
		0,0 m	75 m	150 m		
1	Celdas Residuos solidos	8,04	7,45	7,50	263-445	117-203
2	Celdas Residuos solidos	11,75	18,01	12,71	445-860	203-258,5
3	Base del relleno	-	-	-	860-1083	-

Figura 4-16 Resultados ondas Vp y Vs línea 6
Fuente: Hernán Mancilla



Capas	Descripción	Espesores			Vp (m/s)	Vs (m/s)
		0,0 m	80 m	160 m		
1	Celdas Residuos solidos	19,30	20,60	13,90	273-520	110-327
2	Celdas Residuos solidos	6,90	6,10	5,80	520-850	-
3	Base del relleno	-	-	-	850-1382	-

Fuente: Autor

Figura 4-17 Resultados ondas Vp y Vs línea 7
Fuente: Hernán Mancilla

4.1.4 Cuarto Modelamiento



Figura 4-18 Localización de la línea de estudio relleno sanitario La Cortada

Fuente: Publicación revista colombiana de tecnologías de avanzada. 2020

4.1.4.1 Título de estudio

Caracterización geotécnica del subsuelo en el relleno sanitario regional “La Cortada”, Pamplona (Norte de Santander) a partir de datos geofísicos. 2020.

4.1.4.2 Métodos Aplicados

Tomografía de Refracción Sísmica (TRS)

Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y

Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

4.1.4.3 Resumen

Este trabajo abarca el diseño, la adquisición, el procesamiento y la interpretación de los datos geofísicos. Se obtuvieron perfiles de suelos D y C asociados a areniscas de granos muy finos con ángulos de fricción ϕ entre $19,6^\circ$ - $15,8^\circ$ y $15,8^\circ$ - $12,3^\circ$, capacidad de carga admisible Q_a entre 20,29 - 232,19 kPa y 232,19 - 312,47 kPa respectivamente; Coeficiente de Poisson entre 0,399 y 0,44; Densidades entre 1464,8 – 1538,5 Kg/m³ entre otros parámetros de importancia. La aplicación de técnicas geofísicas actuales y modernas como complemento en la caracterización geotécnica en estudios de ingeniería, es un aporte novedoso en las ciencias de la ingeniería y la geotecnia. Finalmente se muestra un modelo integrado de la información geofísica y geológica.

4.1.4.4 Resultados

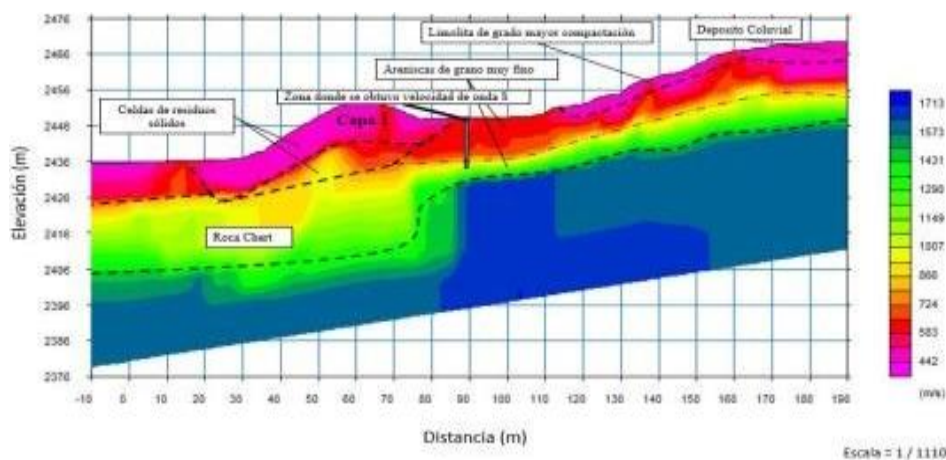


Figura 4-19 Interpretación de resultados de refracción sísmica
Fuente: Publicación revista colombiana de tecnologías de avanzada. 2020

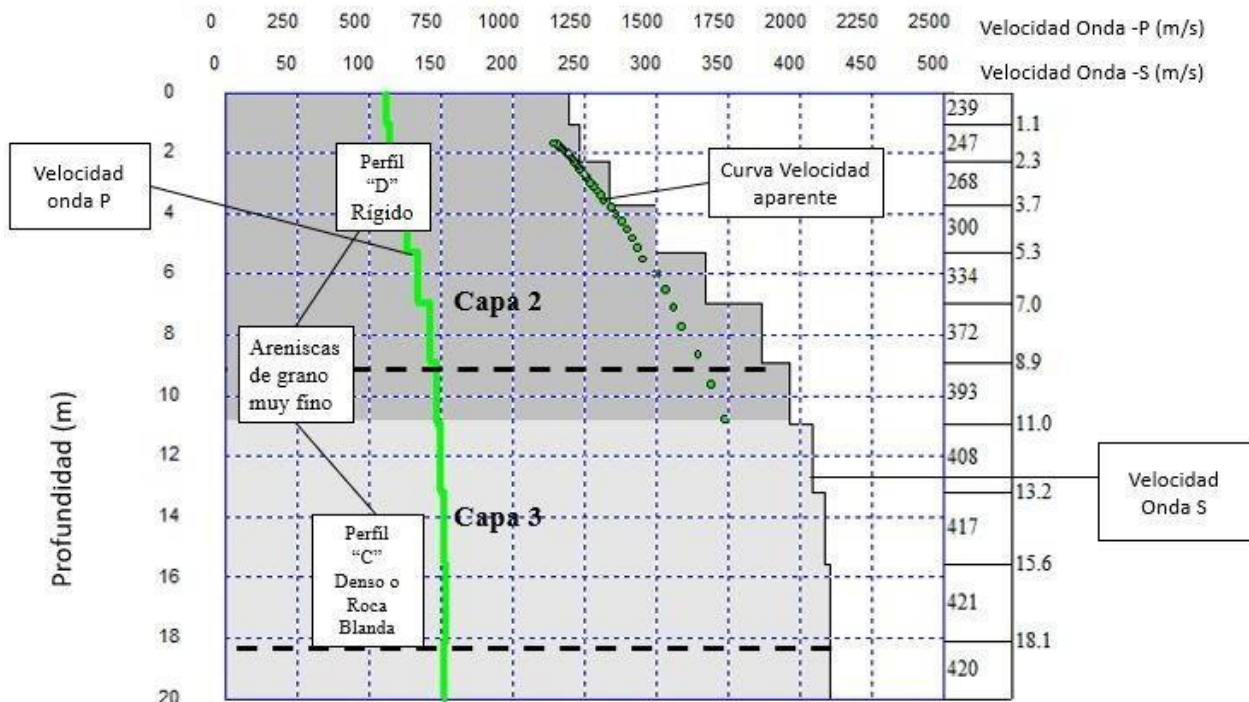


Figura 4-20 Interpretación de resultados de MASW
 Fuente: Publicación revista colombiana de tecnologías de avanzada. 2020

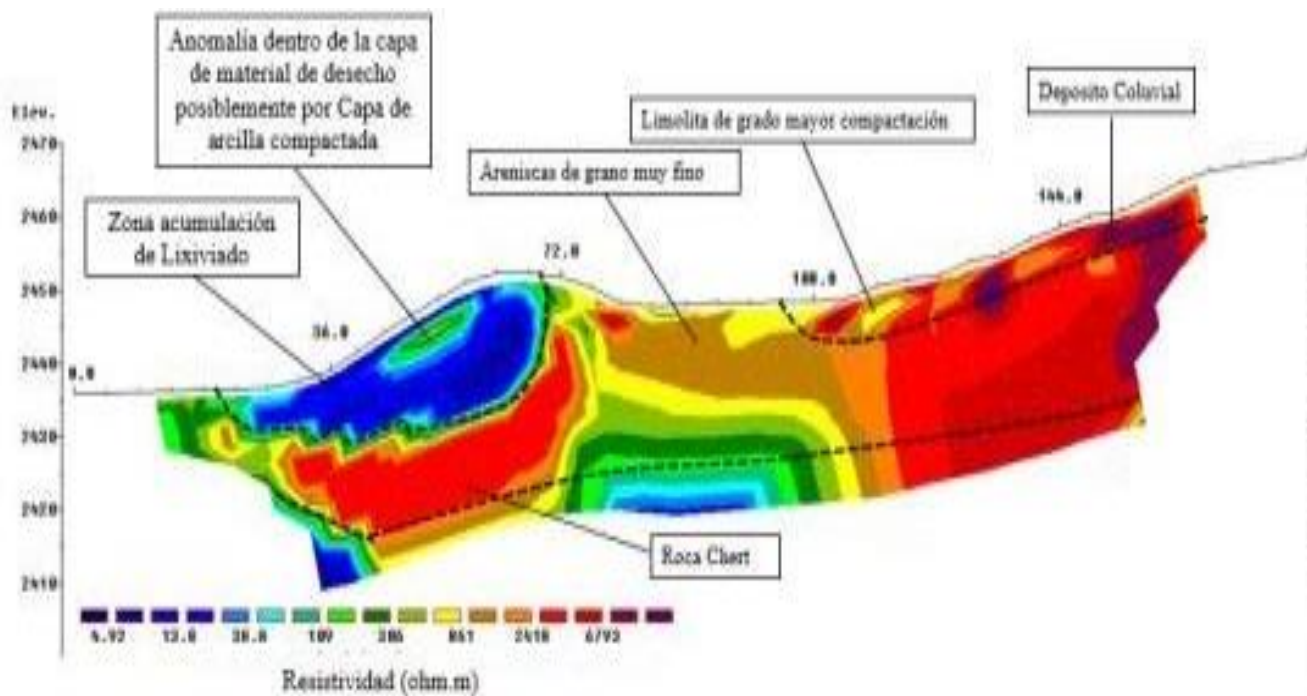


Figura 4-21 Interpretación de resultados de refracción sísmica
 Fuente: Publicación revista colombiana de tecnologías de avanzada. 2020

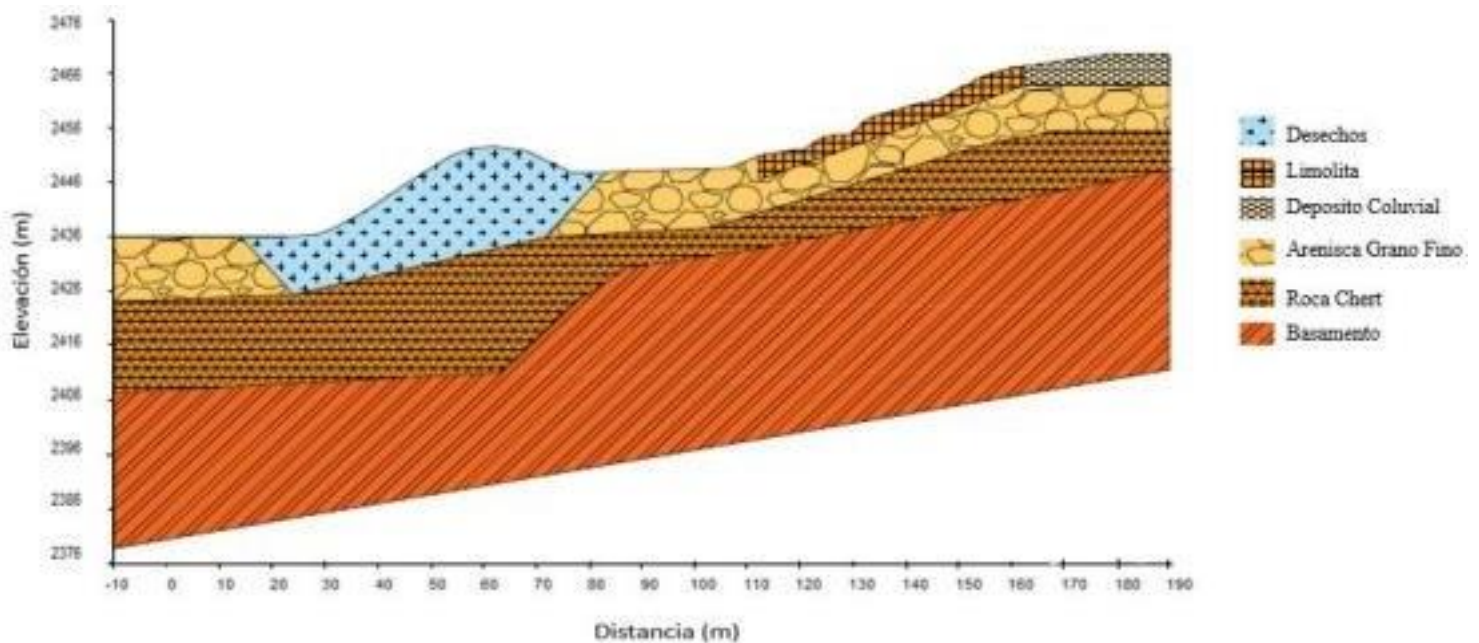


Figura 4-22 Perfil final de suelo con geología local
Fuente: Publicación revista colombiana de tecnologías de avanzada. 2020

Capas	3	4	Capas	3	4
Vp (m/s)	583-1007	1007-1290	Vp (m/s)	583-700	700-780
Vs (m/s)	239-372	372-421	Vs (m/s)	239-372	372-421
Coefficiente de Poisson	0,399-0,421	0,421-0,44	Coefficiente de Poisson	0,399-0,303	0,303-0,294
Densidad (Kg/m3)	1464,8-1519,2	1519,2-1538,5	Densidad (Kg/m3)	1464,8-1519,2	1519,2-1538,5
Módulo de Rigidez ϵ (kN/m2)	83675,9-210238,5	210238,5-272687	Módulo de Rigidez ϵ (kN/m2)	83675,9-210238,5	210238,5-272687
Módulo de Young E (Pa)	234125,3-597497,8	597497,8-785338,7	Módulo de Young E (Pa)	234125,3-547881,5	547881,5-705714
Φ	19,6-15,8	15,8-12,3	Φ	19,6-34,42	34,42-35,70
Qf (kPa)	321,18-928,76	928,7-1249,91	Qf (kPa)	321,18-928,76	928,7-1249-91
Qa (kPa)	20,29-232,19	232,19-312,47	Qa (kPa)	20,29-232,19	232,19-312,47

Tabla 4-2 Parámetros dinámicos obtenidos con los métodos aplicados SRT y MASW
Fuente: Publicación revista colombiana de tecnologías de avanzada. 2020

4.1.5 Quinto Modelamiento



Figura 4-23 Líneas de estudio relleno sanitario La Cortada zona clausurada
Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

4.1.5.1 Título de estudio

Propuesta urbanística para el aprovechamiento del recurso suelo en zonas clausuradas en el relleno sanitario del municipio de Pamplona Norte de Santander mediante técnicas geofísicas.

4.1.5.2 Métodos Aplicados

Tomografía de Refracción Sísmica (TRS)

Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

4.1.5.3 Resumen

En esta investigación se desea determinar de acuerdo con datos obtenidos en los ensayos de refracción sísmica ,y MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) por el autor Mancilla en la zona clausurada del relleno, los correspondiente modelamientos obteniendo velocidad de ondas P y ondas S datos necesarios para determinar los parámetros dinámicos del suelo mediante modelos matemáticos ,con el fin de realizar una correcta clasificación de acuerdo a la Norma Sismorresistente Colombiana NSR-10 determinando el tipo de suelo presente y sus características.

4.1.5.4 Resultados

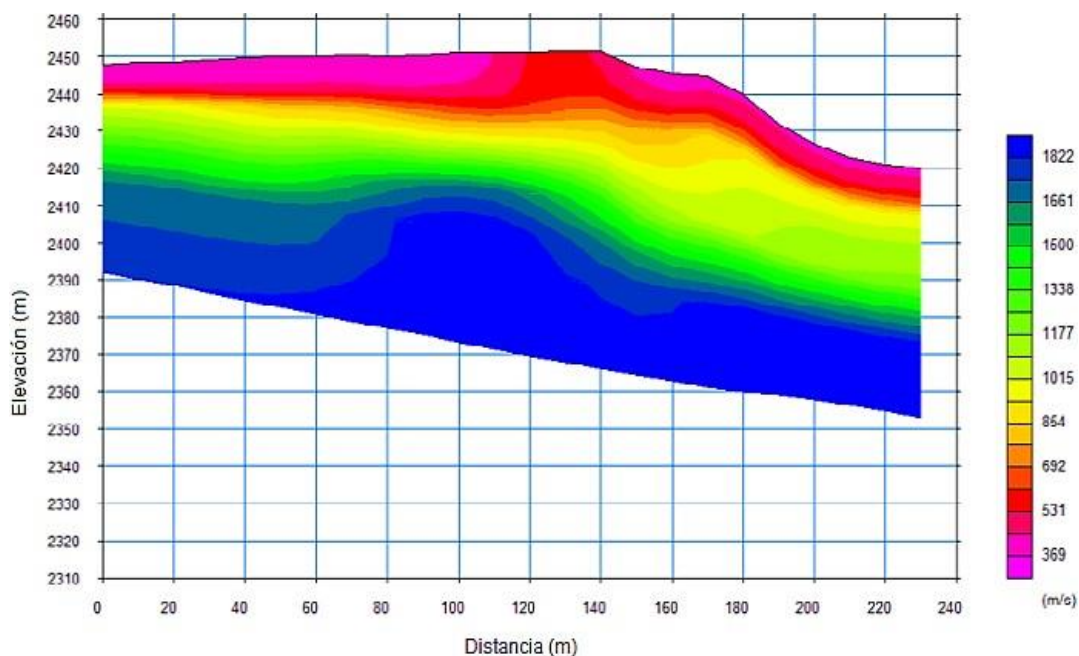


Figura 4-24 Resultados de refracción sísmica (velocidad de onda P) línea 4
Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

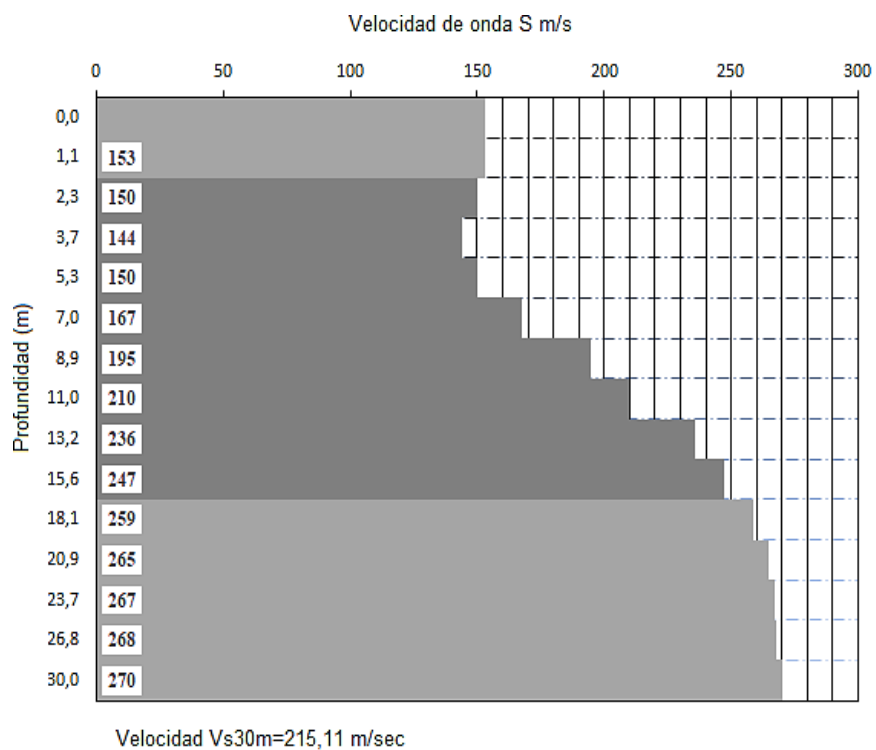


Figura 4-25 Resultados modelo final MASW (velocidad de ondas S) línea 4
Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

Capas	Descripción	Longitud de Línea			Vp	Vs
		0	115	230		
		Espesor				
1	Celda de residuo solido	8	15	10	369-712	153-247
2	Celda de residuo solido	20	19	28	712-1483	247
3	Base del relleno	-	-	-	1483-1822	-

Tabla 4-3 Descripción de velocidades Vp y Vs línea 4
Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

Parámetros Dinámicos	Fórmula	Línea 4	
		Capa 1	Capa 2
Capacidad Portante última (qf) Kpa	$\frac{V_s^{2.4}}{1590}$	110,12-311,60	311,60-430,40
Capacidad Portante Admisible (qa) Kpa	$\left(\frac{V_s^{2.4}}{1590}\right)/n$	27,53-77,89	77,89-107,60
Módulo de Poisson(σ)	$\frac{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2}$	0,40-0,44	0,44-0,48
Densidad del terreno (ρ) Kn/m ³	Tomadas del autor Mancilla, 2007	1,776-1,810	1,776-1,810
Módulo de Rigidez (G)	$G = \rho V_s^2$	41574-100809	100809-131949
Módulo de Young E	$2G(1+\sigma)$	116407-290329	290329-390569

Tabla 4-4 Parámetros dinámicos línea 4
Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

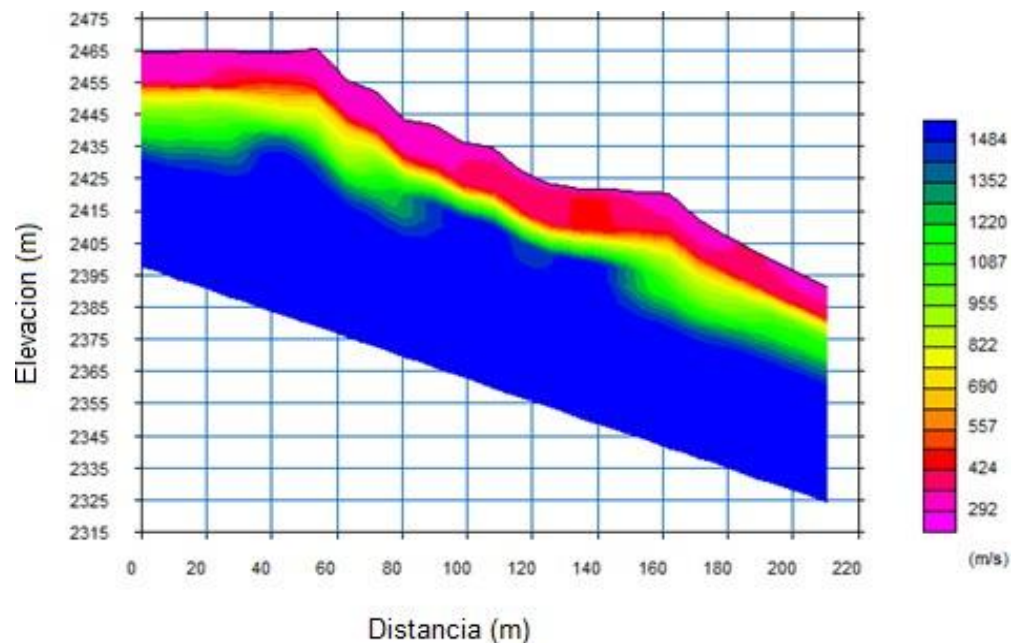


Figura 4-26 Resultados de refracción sísmica (velocidad de onda P) línea 5
Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

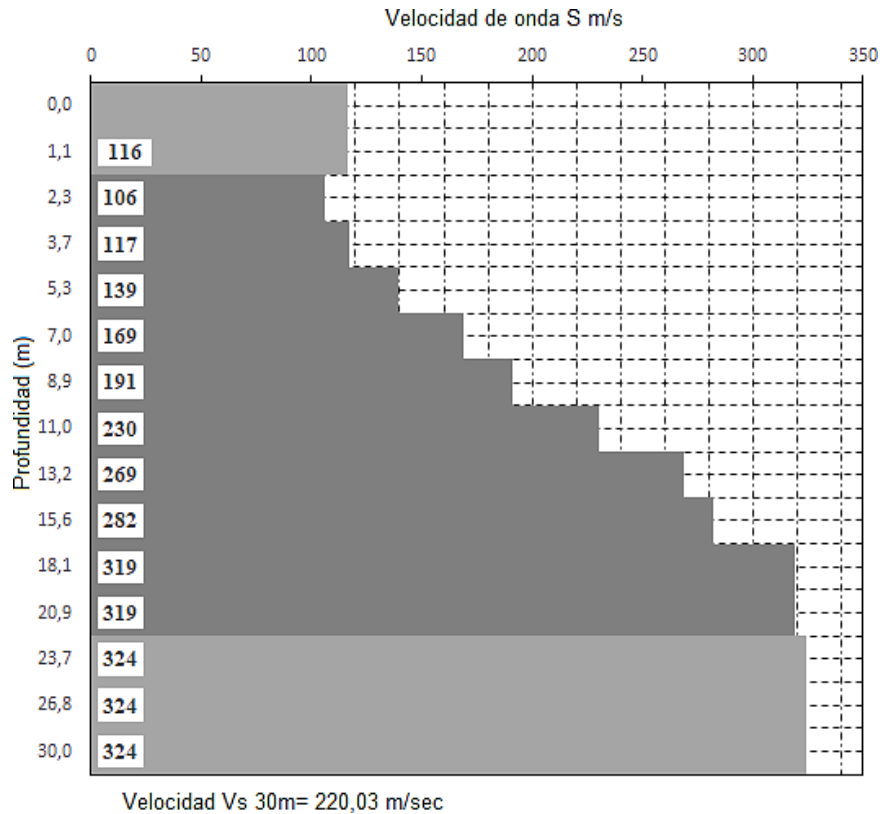


Figura 4-27 Resultados modelo final MASW (velocidad de ondas S) línea 5
Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

Capas	Descripción	Longitud de Línea			Vp	Vs
		0	115	230		
		Espesor				
1	Celda de residuo solido	12	14	10	292-557	116-269
2	Celda de residuo solido	18	8	18	557-1087	269-319
3	Roca sedimentaria lutita	-	-	-	1087-1485	-

Tabla 4-5 Descripción de velocidades Vp y Vs línea 5
Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

Parámetros Dinámicos	Fórmula	Línea 5	
		Capa 1	Capa 2
Capacidad Portante última (qf) Kpa	$\frac{V_s^{2.4}}{1590}$	56,66-426,58	426,58-642,24
Capacidad Portante Admisible (qa) Kpa	$\left(\frac{V_s^{2.4}}{1590}\right)/n$	14,16-106,65	106,65-160,55
Módulo de Poisson(σ)	$\frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$	0,37-0,41	0,35-0,45
Densidad del terreno (ρ) Kn/m3	Tomadas del autor Mancilla, 2007	1,767-1,848	1,767-1,848
Módulo de Rigidez (G)	$G = \rho V_s^2$	23898-127871	127871-188054
Módulo de Young E	$2G(1+\sigma)$	65480-36059	345251-545357

Tabla 4-6 Parámetros dinámicos línea 5
Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

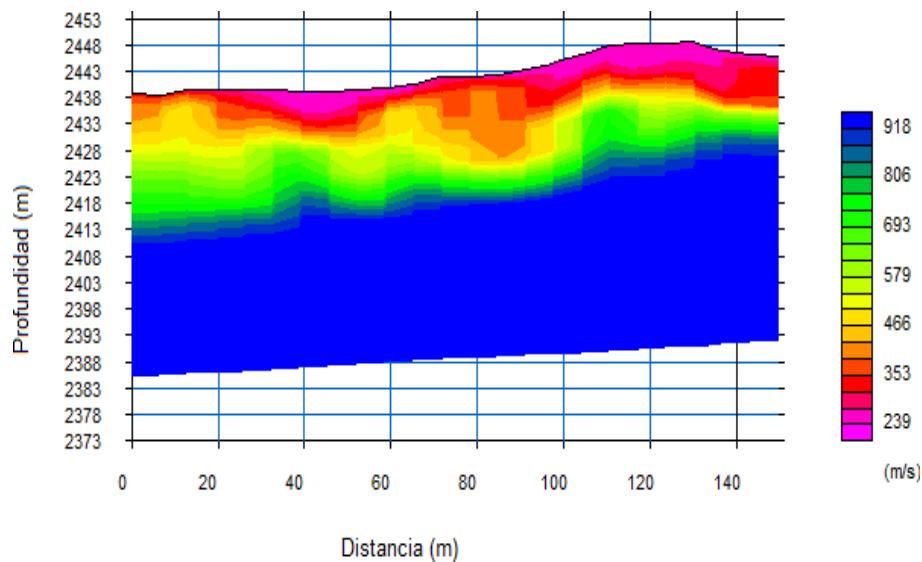


Figura 4-28 Resultados de refracción sísmica (velocidad de onda P) línea 6
Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

Capas	Descripción	Longitud de Línea			Vp	Vs
		0	75	150		
		Espesor				
1	Celda de residuo solido	2	11	10	239-402	194-279
2	Celda de residuo solido	27	15	10	402-890	279-286
3	Roca sedimentaria lutita	-	-	-	890-971	-

Tabla 4-7 Descripción de velocidades Vp y Vs línea 6
Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

Parámetros Dinámicos	Fórmula	Línea 5	
		Capa 1	Capa 2
Capacidad Portante última (qf) Kpa	$\frac{V_s^{2.4}}{1590}$	194,68-465,64	465,64-494,18
Capacidad Portante Admisible (qa) Kpa	$\left(\frac{V_s^{2.4}}{1590}\right)/n$	48,57-116,41	116,41-123,54
Módulo de Poisson(σ)	$\frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$	0,35-0.46	0.44-0.46
Densidad del terreno (ρ) Kn/m3	Tomadas del autor Mancilla, 2007	1,770 – 1,790	1,790 – 1,823
Módulo de Rigidez (G)	$G = \rho V_s^2$	66616-139335	139335-144779
Módulo de Young E	$2G (1+\sigma)$	179863-406858	402399-422754

Tabla 4-8 Parámetros dinámicos línea 6
Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

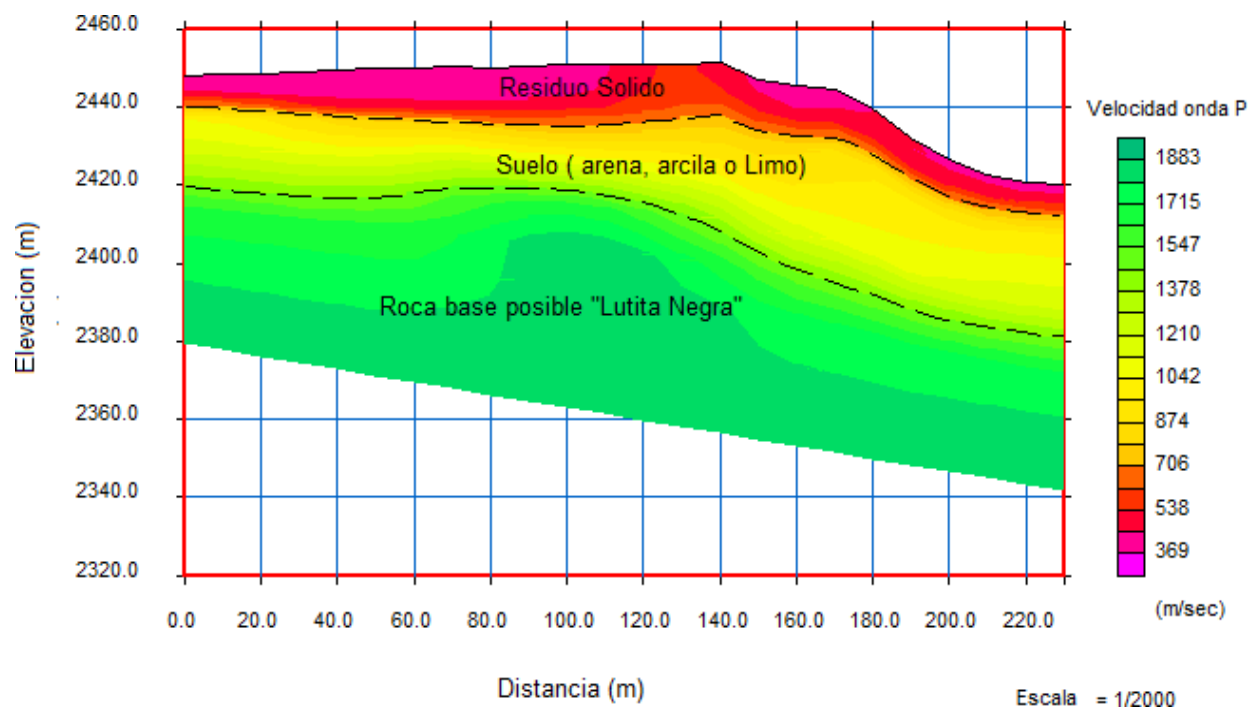


Figura 4-29 Clasificación del suelo línea 4
 Fuente: Publicación revista UIS ingenierías. 2020

Capítulo 5

Contraste de los resultados obtenidos de las ondas de velocidad Vs, mediante la aplicación de los métodos geofísicos con lo que establece la norma NSR-10 en cuanto a caracterización y parámetros dinámicos del suelo.

La NSR-10 Es el reglamento colombiano encargado de regular las condiciones con las que deben contar las construcciones en nuestro país, con el fin de que la respuesta estructural a un sismo sea favorable. Fue promulgada por el Decreto 926 del 19 de marzo de 2010.

En primera instancia denotaremos la importancia de los resultado de las velocidades Vs y Vp en la clasificacion del tipo de perfil y la determinacion de los parametros dinamicos del subsuelo.

5.1 Aspecto en la clasificacion del tipo de perfil de suelo

NSR-10 en su Titulo A, numeral **A.2.4.2-Tipos de perfil de suelo**, define seis tipos de perfil de suelo de acuerdo a parametros correspondientes a los 30 m superiores del perfil.

5.1.1 Parametros empleados en la definicion

NSR-10 Titulo A en su numeral **A.2.4.3-Parametros empleados en la definicion del tipo de perfil de suelo**, define el tipo de perfil con base en los 30 m superiores del perfil, denotando la velocidad media de la onda cortante Vs en m/s.

A.2.4.3.1 — Velocidad media de la onda de cortante — La velocidad media de la onda de cortante se obtiene por medio de:

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \quad (\text{A.2.4-1})$$

donde:

v_{si} = velocidad media de la onda de cortante del suelo del estrato i , medida en campo, en m/s

d_i = espesor del estrato i , localizado dentro de los 30 m superiores del perfil

$\sum_{i=1}^n d_i = 30$ m siempre

Figura 5-1. Denotación de velocidad media de la onda cortante V_s

Fuente: NSR-10 Título A.

Tabla A.2.4-1
Clasificación de los perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$180 \text{ m/s} > \bar{v}_s$
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	IP > 20 w $\geq 40\%$ $50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Figura 5-2. Clasificación del perfil de suelo media de la velocidad de onda V_s

Fuente: NSR-10 Título A

Tabla A.2.4-2
Criterios para clasificar suelos dentro de los perfiles de suelo tipos C, D o E

Tipo de perfil	\bar{v}_s	\bar{N} o \bar{N}_{ch}	\bar{s}_u
C	entre 360 y 760 m/s	mayor que 50	mayor que 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	entre 180 y 360 m/s	entre 15 y 50	entre 100 y 50 kPa (0.5 a 1 kgf/cm ²)
E	menor de 180 m/s	menor de 15	menor de 50 kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)

Figura 5-3. Criterio para clasificar los suelo de los perfiles C, D o E
Fuente: NSR-10 Título A

5.2 Aspectos en la utilización de estudios sísmicos y geotécnicos

La NSR-10 enuncia en los siguientes numerales lo competente al objeto de nuestra revisión y análisis respecto a la implementación de métodos geofísicos para estudios de microzonificación sísmica.

A-2.9.3.5 Estudios geotécnicos, con base en información de estudios geotécnicos existentes y realizados especialmente para el estudio de microzonificación sísmica, debe determinarse en el inciso (c) de éste numeral, lo siguiente:

- c. Determinación de las velocidades de ondas P y S, utilizando procedimientos de medición en el sitio (métodos geofísicos de propagación de ondas tales como técnicas de cross-hole o down-hole, entre otros) o utilizando correlaciones con otros parámetros representativos para complementar el perfil de velocidades.

A.2.10.3 Utilización de los resultados, los estudios sísmicos particulares de sitio hacen parte de los estudios geotécnicos que deben presentarse para la aprobación de la licencia de construcción de la edificación como lo indica el inciso A.1.3.2 y deben ser aprobados por los curadores urbanos, o en su defecto, las autoridades municipales encargadas de expedir las licencias de construcción de acuerdo a lo establecido por la ley 388 de 1997.

En el título H, numeral **H.7.1 Aspectos básicos**, enuncia que para realizar la evaluación geotécnica de efectos sísmicos que deben ser considerados en el diseño de estructuras se parte de los aspectos básicos que están relacionados con la modificación del movimiento del terreno. Adicionalmente los aspectos básicos contribuyen a cuantificar de una manera acertada las incertidumbres relacionadas con la respuesta dinámica del terreno, las condiciones de estabilidad de los materiales, y los efectos en suelos granulares y en suelos de grano fino de baja plasticidad.

En el **H.7.1.1 Efectos de la litología y tipos de suelos**, en el primer inciso enuncia:

- a. La caracterización básica del perfil litológico se establece en términos de los valores de la velocidad de corte V_s , con la profundidad y su variación horizontal, hasta el nivel de roca o suelos duros $V_s > 500$ m/s, mediante ensayos geofísicos en el terreno.

5.3 Aspectos en la determinación de los parámetros dinámicos del suelo

Con los valores obtenidos de onda de velocidad V_s y la ayuda de modelos matemáticos descritos en la literatura de diversos autores del área de Geotécnica, podemos hallar y determinar los siguientes parámetros:

Parámetros Dinámicos	Fórmula	Interpretación
Capacidad Portante última (qf) Kpa	$\frac{V_s^{2.4}}{1590}$	V_s : Velocidad de onda S
Capacidad Portante Admisible (q _a) Kpa	$\left(\frac{V_s^{2.4}}{1590}\right)/n$	V_s : Velocidad de onda S n: Factor de seguridad
Módulo de Poisson (σ)	$\frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$	V_s : Velocidad de onda S V_p : Velocidad de onda P
Densidad del terreno (ρ) Kn/m ³	$\rho = \frac{G}{V_s^2}$	G: Modulo de rigidez
Módulo de Rigidez (G)	$G = \rho V_s^2$	ρ : Densidad del terreno
Módulo de Young E	$2G(1+\sigma)$	σ : Modulo de Poisson

Tabla 5-1. Modelos matemáticos para determinar los parámetros dinámicos del suelo
Fuente: Mantilla H. R

Tipo de material	Ratio de Poisson ν
Arcilla	0.4-0.45
Arena	0.30-0.40
Roca	0.15-0.25

Tabla 5-2. Valores típicos relación de Poisson
Fuente: Rodríguez Montse. Caracterización de la respuesta sísmica de los suelos.

5.4 Cuadro comparativo en la utilización de las ondas Vp y Vs para determinar parámetros dinámicos y diseño

dispuestos por la norma NSR-10 Colombiana, aplicados para diferentes modelamientos realizados en el RS la Cortada.

Cuadro comparativo de los resultados obtenidos en la implementación de métodos geofísicos aplicados a zonas activas y clausuradas del relleno sanitario "La cortada" municipio de Pamplona-Norte de Santander. Determinando las ondas de velocidad Vs y Vp como parámetro requerido por la norma sismo resistente NSR-10 colombiana, para la caracterización del subsuelo y determinación de parámetros dinámicos del suelo.															
Tipo de estudio	Zona de estudio		Capas	Resultados				DISPOSICION DE LA ONDAS Vs SEGUN NSR-10 (TITULO A)						Utilización de resultados	
				Ondas Vp m/s	Ondas Vs m/s	Resistividad Ωm	Z máxima m	Perfil de suelo	Parámetros dinámicos del suelo						
									qf (kpa)	qa (kpa)	σ	C (kN/m2)	ρ		E (Pa)
Modelamiento 1 Método: Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) Título: Aplicación de métodos geoelectrónicos en zonas clausuradas y activas del relleno sanitario regional "La Cortada" municipio de Pamplona, Norte de Santander (2017) Autor: Yamier David Hinojosa Carvajal	Activa	L1			0.735-5328	30									
	Activa	L2			2.91-3812	35									
	Activa	L3			60.9-41010	27									
	Clausurada	L4			8.57-2105	42									
	Clausurada	L5			4.3-440.8	38.5									
	Clausurada	L6			0.513-1561	25									
	Clausurada	L7			2.76-492	32									
Modelamiento 2 Método: Tomografía de Refracción Sísmica (TRS) Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) Título: Métodos Geofísicos aplicados a las celdas activas y clausuradas del relleno sanitario "La Cortada" (Pamplona, Norte de Santander) 2017. Autores: Torres J.A, Cantillo J.R, Contreras M. A	Activa	L1	804-3000	200-650	119-8548	TRS= 32.37 MASW= 15 TRE= 26.2	C y D	209.4-3544.8	52.4-886.2	0.467-0.475	69960-738953	1.749	205263-2179911	Deben presentarse para la aprobación de la licencia de construcción de la edificación como lo indica el inciso A.1.3.2 y deben ser aprobados por los curadores urbanos, o en su defecto, las autoridades municipales encargadas de expedir las licencias de construcción de acuerdo a lo establecido por la ley 388 de 1997.	
	Activa	L2	518-2062	239-390	5.28-6769	TRS= 39.67 MASW= 17 TRE= 30.4	C y D	321.2-1040.3	80.3-260.1	0.365-0.481	100190-266783	1.754	273519-790211		
	Activa	L3	200-384	60-75	10.1-1114	TRS= 22 MASW= 12.5 TRE= 11.8	E	11.7-19.9	2.93-4.96	0.451-0.480	6505-10164	1.807	18877-30085		
	Clausurada	L4	793-1608	177-266	6.9-7310	TRS= 23.5 MASW= 14.5 TRE= 27	D	156.2-415.3	39.1-103.8	0.474-0.486	55640-125663	1.776	164027-373470		
	Clausurada	L5	407-711	177-300	10.2-3613	TRS= 27 MASW= 18 TRE= 40.5	D	156.2-554.2	39.1-138.6	0.383-0.392	55358-159030	1.767	153120-442740		
Modelamiento 3 Método: Tomografía de Refracción Sísmica (TRS) Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) Título: Caracterización Geofísica de las zonas clausuradas y en operación, en las instalaciones del relleno sanitario regional "La Cortada" municipio de Pamplona, Norte de Santander, a partir de la aplicación de TRS y MASW. 2017 Autor: Hernán Ramiro Mancilla Vesga	Activa	L1	1 Celda RS	233-244	63-99	TRS= 30 MASW= 20	E	13.1-38.7	3.3-9.7	0.401-0.461	6942-17230	1.749	20284-48278		
			2 Celda RS	244-890	78-182		E	21.9-167	5.5-41.8	0.443-0.478	10690-58861	1.757	30852-174015		
			3 Base Rell.	890-2015											
	Activa	L2	1 Celda RS	375-870	83-158	TRS= 35 MASW= 22	E	25.4-119	6.3-29.7	0.474-0.483	12083-44336	1.754-1.776	35627-131496		
			2 Base Rell.	870-2833											
	Activa	L3	Capa 1	537-605	178-340	TRS= 27 MASW= 22	D	158.3-748.4	39.6-187.1	0.269-0.438	57253-213051	1.807-1.843	164692-540805		
			Capa 2	605-910	340-352		D	748.4-813.4	187.1-203.4	0.269-0.412	213051-229966	1.843-1.856	540805-649435		
			Capa 3	910-1910	352-635		C	813.4-3351.7	203.4-837.9	0.412-0.438	229966-787498	1.856-1.953	649435-2264637		
Capa 4			1910-1997												
Clausurada	L4	1 Celda RS	233-850	125-337	TRS= 42 MASW= 22	D y E	67.8-732.7	16.9-183.2	0.298-0.407	27750-205560	1.776-1.810	72036-578342			

			2 Base Rell.	850- 1584														
	Clausurada	L5	1 Celda RS	300- 870	127- 361		TRS= 38.5 MASW= 22	C y E	70.4-864.2	17.6- 216.1	0.391- 0.396	28500- 240833	1.767- 672409	79277- 672409				
			2 Base Rell.	870- 2343														
	Clausurada	L6	1 Celda RS	263- 445	117- 203		TRS= 25 MASW= 22	D y E	57.8-217.1	14.5- 54.3	0.369- 0.377	24230- 73764	1.770- 1.790	67710- 201908				
			2 Celda RS	445- 860	203- 258.5			D	217.1-389.5	54.3- 97.4	0.369- 0.450	73764- 122289	1.790- 1.823	201908- 354668				
			3 Base Rell.	860- 1083	110- 327			D y E										
	Clausurada	L7	1 Celda RS	273- 520	110- 327		TRS= 32 MASW= 22	D y E	49.9-681.6	12.5- 170.4	0.403- 0.173	21369- 194504	1.766- 1.819	59964- 456283				
			2 Celda RS	520- 850														
			3 Base Rell.	850- 1382														
Modelamiento 4 Método: Tomografía de Refracción Sísmica (TRS) Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) Título: Caracterización geotécnica del subsuelo en el relleno sanitario regional "La Cortada", (Pamplona, Norte de Santander) a partir de datos geofísicos. 2020. Autores: Torres J.A, Cantillo J.R, Contreras M. A	Activa	L1	1 Celda RS	442- 866		4.92-6793	TRS= 43.87 MASW= 20 TRE= 35											
			2 Estrato 1	442- 583														
			3 Estrato 2	853- 1007	239- 372			C y D	321.2-928.8	80.3- 232.2	0.421- 0.457	102247- 252274	1.790- 1.823	297948- 716963				
			4 Estrato 3	1007- 1292	372- 421			D y E	928.8-1249.9	464.4- 624.9	0.421- 0.441	256841- 346152	1.856- 1.953	729942- 997610				
Modelamiento 5 Método: Tomografía de Refracción Sísmica (TRS) Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) Título: Propuesta urbanística para el aprovechamiento del recurso suelo en zonas clausuradas en el relleno sanitario del municipio de Pamplona Norte de Santander mediante técnicas geofísicas. Autores: Hernández A.M, Pabón A.L, Acuña J. F	Clausurada	L4	1 Celda RS	369- 712	153- 247		TRS= 42 MASW= 30	C	110.12-311.60	27.53- 77.89	0.40- 0.44	41574- 100809	1.776- 1.810	116407- 290329				
			2 Celda RS	712- 1483	247			D	311.60-430.40	77.89- 107.6	0.44- 0.48	100809- 131949	1.776- 1.810	290329- 390569				
			3 Base rell.	1483- 1822														
		L5	1 Celda RS	292- 557	116- 269		TRS= 38.5 MASW= 30	D y E	56.66-426.58	14.16- 106.65	0.37- 0.41	23898- 127871	1.767- 1.848	65480- 36059				
			2 Celda RS	557- 1087	269- 319			C y D	426.58-642.24	106.65- 160.55	0.35- 0.45	127871- 188054	1.767- 1.848	345251- 545357				
			3 Roca sediment.	1087- 1485														
		L6	1 Celda RS	239- 402	194- 279		TRS= 25 MASW= 30	D	194.68-465.64	48.57- 116.41	0.35- 0.46	66616- 139335	1.770- 1.790	179863- 406858				
			2 Celda RS	402- 890	279- 286			D	465.64-494.18	116.41- 123.54	0.44- 0.46	139335	1.790- 1.823	402399- 422754				
			3 Basereff.	890- 971														

Deben presentarse para la aprobación de la licencia de construcción de la edificación como lo indica el inciso A.1.3.2 y deben ser aprobados por los curadores urbanos, o en su defecto, las autoridades municipales encargadas de expedir las licencias de construcción de acuerdo a lo establecido por la ley 388 de 1997.

Tabla 5-3. Cuadro comparativo en la utilización de las ondas Vp y Vs para determinar parámetros dinámicos y diseño dispuestos por la norma NSR-10 Colombiana. Fuente: Autor

Capítulo 6

Concepto técnico en la implementación de métodos geofísicos aplicados a zonas clausuradas de rellenos sanitarios, sus resultados y la disposición de la norma NSR-10 Colombiana, con el fin de aprovechar el recurso suelo.

6.1 Concepto técnico en la investigación

Los métodos geofísicos utilizados tales como tomografía de refracción sísmica (TRS) y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), se puede considerar muy apropiados para la poder llegar a la caracterización de suelos y determinar los parámetros dinámicos en rellenos sanitarios. La información que facilitan éstas técnicas, son muy acertadas, pues describen la composición de los materiales en el subsuelo, así como las posibles zonas que lo componen. Son de gran ayuda a la hora de tomar decisiones de aspecto geotécnico que le contribuirán al ingeniero civil una herramienta en el desarrollo de sus proyectos y obras.

Entrando en el análisis de los resultados arrojados para los diferentes modelamientos realizados en las zonas clausuradas del relleno sanitario La Cortada objeto de ésta investigación, se determinó la geometría del relleno sanitario en imágenes 2D de las líneas de estudio planteadas por cada uno de los autores revisados. Esta investigación corrobora el hecho de que la utilización de los métodos geofísicos pueden arrojar valiosa información para evaluar las condiciones de los suelos de éstos rellenos durante y después de su intervención. Para nuestro caso es de vital importancia conocer como está caracterizado el suelo en esas zonas clausuradas y como se relaciona los parámetros dinámicos del subsuelo

con lo dispuesto en la norma NSR-10 Colombiana, que reglamenta el aspecto constructivo y sísmo resistente para una posible intervención de obra civil como medida de aprovechamiento del recurso suelo.

Al analizar las velocidades bajas obtenidas en los diversos modelamientos podemos demostrar la relacionadas con zonas de material de desecho, lo que nos permite identificar con claridad las franjas donde se depositan estos residuos sólidos, comportándose siempre como materiales incompetentes tanto en las áreas activas como clausuradas del relleno sanitario.

Podemos denotar que las velocidades de ondas V_s , fueron más bajas en las zonas activas que en las clausuradas, que si entramos a analizar en detalle las imágenes topográficas se relaciona con la producción de lixiviado, debido a los tiempos de descomposición de los residuos sólidos dispuestos en las celdas activas, algún tipo de falla en las geomembranas y por ende el agua superficial por infiltración.

Analizando los cálculos realizados con los valores obtenidos en cada uno de los modelamientos por parte de los autores para ondas de velocidad V_p y V_s para la determinación de los parámetros dinámicos para las dos zonas, nos permite evidenciar que estos suelos no son óptimos para establecer edificaciones u otro tipo de estructuras que exigen una alta capacidad portante en el suelo, debido a que sus valores se encuentran y las

condiciones ambientales no estarían avaladas por la NSR-10, ni mucho menos por las entidades gubernamentales que otorgan las licencias de construcción.

Por tal razón se aconseja desarrollar proyectos enfocados al paisajismo como son los parques contemplativos y la recuperación de la capa vegetal que en su momento poder llegar a desarrollar planes de reforestación como medida óptima para la recuperación de la flora y la fauna nativa de la región.

Conclusiones

Las nuevas técnicas de geofísica son acertadas, donde considera la caracterización y así mismo los parámetros dinámicos para así poder hallar la capacidad portante por medio de ellos. Destacamos que en éste trabajo se desarrollaron dos métodos importantes para la obtención de datos tanto en la clasificación de los perfiles de suelo con en la determinación de los parámetros dinámicos del mismo, mencionados anteriormente MASW y refracción sísmica donde se obtuvieron las ondas P y a su vez las velocidades (V_s) donde se determinó que capacidad portante tenía el terreno y se evaluó una posible construcción en zonas clausuradas donde hay presencia de residuos sólidos.

Se analizó las capacidades portantes obtenidas y así mismo se verificó la disposición que emana la norma NRS-10 qué tan permisible era el suelo para el tipo de estructura que se desea construir. Para el cálculo de capacidad portante admisible se tuvo en cuenta el grado de incertidumbre que se tiene con los datos obtenidos por estos métodos no invasivos por ende se tomó un factor de seguridad grande en este caso 4 cumpliendo con el rango para las velocidades V_s menores a 750 m/s.

Se sugiere que para llevar a cabo este tipo de proyectos se realice un trabajo más complementario con estudios geotécnicos los cuales aportarían mayor confiabilidad en los parámetros del suelos, esto con el fin de corroborar el análisis realizado mediante los métodos geofísicos los cuales son recomendables en este tipo de suelos en los cuales no es común utilizar ensayos de SPT debido a la composición de los relleno sanitarios.

Lista de referencias

- Mancilla, H. R “Caracterización geofísica de las zonas clausuradas y en operación en las instalaciones del relleno sanitario regional “La Cortada” del municipio de Pamplona, Norte de Santander a partir de la aplicación de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)”, tesis de grado, Universidad de Pamplona, Programa de Ingeniería Civil,2017.
- Hinojosa, Y. D “Métodos Geofísicos aplicados a las celdas activas y clausuradas del relleno sanitario “La Cortada” (Pamplona, Norte de Santander) Universidad de Pamplona, Programa de Ingeniería Civil, “2017.
- Torres J.A, Cantillo J.R, Contreras M. A “Métodos Geofísicos aplicados a las celdas activas y clausuradas del relleno sanitario “La Cortada” (Pamplona, Norte de Santander) “Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo 2017.
- Torres J.A, Cantillo J.R, Contreras M. A “Caracterización geotécnica del subsuelo en el relleno sanitario regional “La Cortada”, (Pamplona, Norte de Santander) a partir de datos geofísicos “. Revista Colombiana de Tecnología de Avanzasa. 2020.

- Hernández A.M, Pabón A.L, Acuña J. F “Propuesta urbanística para el aprovechamiento del recurso suelo en zonas clausuradas en el relleno sanitario del municipio de Pamplona Norte de Santander mediante técnicas geofísicas “. Revista UIS Ingenierías 2020.
- A. Quintana,” Aplicación de la tomografía Eléctrica en la caracterización del deslizamiento de Doña Mencia”, Tesis de Magister, Universidad de Granada, Instituto Andaluz de geofísica, 2013.
- J. Jaimes, “Métodos Geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: Estado del Arte”, tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, escuela ingeniería civil, Bucaramanga, 2011.
- Alcaldía de Pamplona, “Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT)”,2015. [línea]. Disponible en: <http://pamplonanortedesantander.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestio y Control/DIAGN%C3%93STICO%20PBOT%20PAMPLONA.pdf>. [Accedido: 28-mayo-2020].