

**CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO MEDIANTE LAS TÉCNICAS
DE REFRACCIÓN SÍSMICA, REFLEXIÓN SÍSMICA, MASW Y REMI EN
DEPÓSITOS SUPERFICIALES Y ZONAS CRÍTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE
PAMPLONA.**



**Autores
Kelly Dayana Gutiérrez Pico
Leidy Geraldine Buitrago Huertas**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
PAMPLONA, JUNIO DE 2016**

**CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO MEDIANTE LAS
TÉCNICAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA, REFLEXIÓN SÍSMICA, MASW Y REMI
EN DEPÓSITOS SUPERFICIALES Y ZONAS CRÍTICAS DE LA UNIVERSIDAD
DE PAMPLONA.**

**KELLY DAYANA GUTIERREZ PICO
LEIDY GERALDINE BUITRAGO HUERTAS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Civil.**

**Director
MSc. JAIRO ALBERTO TORRES PEÑA
Codirector
Ing. MANUEL ANTONIO CONTRERAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
PAMPLONA, JUNIO DE 2016**

DEDICATORIA

Dedicado a:

A mi madre Luz Angela Pico Naranjo, por su gran valentía, dedicación y empeño puestos en mi crianza, por ser mi motivación, por nunca dudar de mí y siempre creer que sería una Ingeniera Civil.

A mi padre y hermana, quienes me apoyaron en momentos difíciles.

A "Fonso", por su gran apoyo ético y moral, por creer en mí y siempre alentarme en los momentos que sentí desfallecer.

A mis compañeros "mis cómplices", quienes aportaron un grano de arena en mi formación emocional y personal, los cuales estuvieron en los buenos y malos momentos dando una voz de aliento.

A cada uno de los docentes que hicieron parte del proceso de formación académica.

Por ultimo a mí misma, por superar con valentía cada uno de los obstáculos que se presentaron a lo largo de todo el proceso y lograr este tan anhelado sueño de ser una Ingeniera Civil de buenos principios.

Kelly Dayana Gutiérrez Pico.

Dedicado a:

Al todo poderoso por sus bendiciones y nunca abandonarme.

A mi madre Marlen Huertas, por su apoyo y fortaleza, por estar en los momentos en los que más la necesite, por ser mi ejemplo y mi motivación para salir adelante en todos estos años, por cada momento en los que sentí caer y ella estuvo ahí para ayudarme a levantar.

A mi padre Raúl Buitrago, mis hermanos, a mis tíos y tías por su apoyo, oraciones y buenos deseos, por creer en mí desde el primer día, creer en mi sueño y nunca dudar que sería una Ingeniera Civil.

A Jairo Patarroyo, mi mayor apoyo en este camino, por ser mi polo a tierra, por creer en mis capacidades y ser mi fortaleza.

Al Ingeniero Juan Manuel Holguin Saenz, por su apoyo incondicional y por brindarme su mano a dar el primer paso, a la señora Martha Perez por su cariño y empeño para poder culminar con éxito mi carrera.

A mis abuelitos Jose Buitrago y Alicia Mendoza, porque sé el cariño y lo que mi futuro significaba para ellos, porque aunque en este momento nos e encuentren en este mundo, sé que desde el cielo me acompañan y protegen y desde allá que están orgullos de la persona que soy hoy en día.

A mis docentes, que aportaron su conocimiento para formarme como una profesional integra.

A mis amigos y compañero con los que recorrí este camino hacia la victoria que hoy culmina con el tan anhelado título de Ingenieros Civiles.

Y por último a mí misma, por superar todos los obstáculos y afrontar con valentía cada uno de los retos puestos en este camino.

Leidy Geraldine Buitrago Huertas.

AGRADECIMIENTOS

Completamente agradecidas con todas las personas que hicieron parte de nuestras vidas, por los buenos deseos y la disposición que tuvieron para con nosotras.

A Ecopetrol y Colciencias por permitirnos hacer parte del proyecto “MIGRACIÓN SÍSMICA PRE-APILADO EN PROFUNDIDAD POR EXTRAPOLACIÓN DE CAMPOS DE ONDA UTILIZANDO COMPUTACIÓN DE ALTO DESEMPEÑO PARA DATOS MASIVOS EN ZONAS COMPLEJAS” aportando nuestro granito de arena para realización del mismo.

También queremos expresar nuestra gratitud y reconocimiento a nuestro director de tesis, MSc. JAIRO ALBERTO TORRES PEÑA y a nuestro codirector ING. MANUEL ANTONIO CONTRERAS, por su conocimiento aportado y ser nuestras guías para la culminación de este proyecto.

Al profesor HERNANDO CASTAÑEDA, por su apoyo incondicional, por estar presente a diario y acompañarnos en el desarrollo de esta investigación con sus grandes aportes.

A nuestro gran amigo JAIRO PADILLA DIAZ y a la ING. LIZETH MARITZA PEÑA PEÑA, por la ayuda prestada a la hora de la toma de datos en campo para el buen desarrollo del proyecto.

A la Universidad de Pamplona por facilitar el equipo necesario para llevar a cabo la toma de datos y así desarrollar satisfactoriamente este proyecto.



RESUMEN

Los métodos que se aplicaron para la caracterización del subsuelo de las zonas de estudio fueron Refracción sísmica, Reflexión sísmica, método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y Refracción por micro-tremores (ReMi).

Esta investigación se desarrolló en cinco zonas ubicadas en la Universidad de Pamplona las cuales tienen un total de 480 m, donde se hizo el diseño de cada línea con el fin de establecer distancia entre geófonos y la ubicación de la fuente. Una vez realizado el diseño de las líneas sísmicas y adquisición de los datos, se lleva a cabo el procesamiento de los mismos mediante los programas SeisImager de la empresa Geometrics y Seismic Unix (CWP), obteniendo así perfiles 1D y 2D de cada zona.

A través de los perfiles obtenidos de onda P y S se puede estimar el número de capas con sus espesores y tipo de material presente en el subsuelo con sus respectivas velocidades, además de los parámetros del subsuelo como son: capacidad portante, módulo de Poisson, módulo de rigidez, módulo de Young, densidad entre otros. Con la obtención de los parámetros anteriormente mencionados se da una posible respuesta al porqué de las fallas presentes en las zonas críticas que se estudiaron.

ABSTRACT

The methods applied for the subsoil's characterization of the study areas were Seismic refraction, Seismic reflection, Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) and Refraction Microtremor (ReMi).

This research was developed in five zones situated in the University of Pamplona, which have a total area of 480m, where was made the design of every line in order to establish the distance between geophones and the source location. Once realized the design of the seismic lines and the data acquisition, the processing of the same ones is carried out by means of the programs SeisImager by the company Geometrics and Seismic Unix (CWP), obtaining this way profiles 1D and 2D of every zone.

Across the profiles obtained of wave P and S it is possible to estimate the number of caps with their thicknesses and the type of present material in the subsoil with its respective speeds In addition the parameters of the subsoil such as: the bearing capacity, Poisson module, rigidity module, Young module, density and others. With the obtaining of the parameters abovementioned a possible response is given to explicate the present faults in the critical zones that were studied.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	6
1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	18
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	18
1.3 OBJETIVOS.....	19
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2 METODOLOGÍA.....	21
3 MÉTODOS SÍSMICOS	24
3.1 ESTADO DEL ARTE.....	24
3.2 GENERALIDADES DE LOS MÉTODOS SÍSMICOS.....	26
3.2.1 ONDAS SÍSMICAS.....	26
3.3 MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA	33
3.3.1 ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO.....	35
3.3.2 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE CURVAS TIEMPO-DISTANCIA.....	36
3.3.3 MODELADO.....	38
3.4 MÉTODO DE REFLEXIÓN SÍSMICA.....	46
3.4.1 ADQUISICION DE DATOS EN CAMPO.....	47
3.4.2 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	48
3.4.3 MODELADO.....	48
3.4.4 MIGRACIÓN O REPOSICIONAMIENTO.....	54
3.5 MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW).....	54
3.5.1 ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO.....	55
3.5.2 ESTIMACIÓN DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN	58
3.5.3 INVERSIÓN DE LA CURVA DE DISPERSIÓN	59
3.6 MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA POR MICRO-TREMORE (ReMi) 60	
3.6.1 ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO.....	61
3.6.2 ANÁLISIS ESPECTRAL DE VELOCIDAD.....	62

3.6.3	SELECCIÓN DE LA CURVA DE DISPERSIÓN FASE-VELOCIDAD DE RAYLEIGH	62
3.6.4	MODELADO DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA S.....	63
3.7	PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SUELO	63
3.7.1	CAPACIDAD PORTANTE (qa)	63
3.7.2	MÓDULO DE POISSON (σ).....	64
3.7.3	MÓDULO DE RIGIDEZ (G)	65
3.7.4	DENSIDAD DEL TERRENO (ρ)	65
3.7.5	MÓDULO DE YOUNG (E)	66
3.8	MARCO GEOLÓGICO	66
4	DISEÑO Y ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS	69
4.1	EQUIPOS UTILIZADOS.....	71
4.1.1	EQUIPOS TOPOGRÁFICOS.....	71
4.1.2	EQUIPOS DE EXPLORACIÓN SÍSMICA	72
4.2	DISEÑO DE LAS LINEAS SÍSMICAS	75
4.2.1	MÉTODO DE REFRACCIÓN Y REFLEXIÓN SÍSMICA.....	75
4.2.2	MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW).....	76
4.2.3	METODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA POR MICRO-TREMORES (ReMi) 77	
4.3	ADQUISICIÓN DE DATOS	77
4.3.1	MÉTODO DE REFRACCIÓN Y REFLEXIÓN SÍSMICA.....	80
4.3.2	MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW).....	80
4.3.3	MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA POR MICRO-TREMORES (ReMi) 80	
5	PROCESAMIENTO DE DATOS SISMICOS	83
5.1	MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA	83
5.2	MÉTODO DE REFLEXIÓN SÍSMICA.....	86
5.3	MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)	87
5.4	MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA POR MICRO-TREMORES (REMI) 90	
6	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	96
6.1	VELOCIDADES DE ONDA P Y S	96

6.1.1	ZONA 1: CANCHA DE FÚTBOL ALBERTO GONZALES.....	97
6.1.2	ZONA 2: BIBLIOTECA PADRE JOSÉ RAFAEL FARÍA BERMÚDEZ 98	
6.1.3	ZONA 3: EDIFICIO ADMINISTRATIVO CETA GENERAL LEONARDO CANAL GONZÁLES	100
6.1.4	ZONA 4: EDIFICIO JORGE GAITÁN DURÁN	102
6.1.5	ZONA 5: VÍA BUCARAMANGA.....	104
6.2	PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SUELO	105
6.2.1	ZONA 1: CANCHA DE FÚTBOL ALBERTO GONZALES.....	106
6.2.2	ZONA 2: BIBLIOTECA PADRE JOSÉ RAFAEL FARÍA BERMÚDEZ 107	
6.2.3	ZONA 3: EDIFICIO ADMINISTRATIVO CETA GENERAL LEONARDO CANAL GONZÁLES	109
6.2.4	ZONA 4: EDIFICIO JORGE GAITÁN DURÁN	110
6.2.5	ZONA 5: VÍA BUCARAMANGA	113
6.3	PERFILES OBTENIDOS.....	114
6.3.1	ZONA 1: CANCHA DE FÚTBOL ALBERTO GONZALES.....	115
6.3.2	ZONA 2: BIBLIOTECA PADRE JOSÉ RAFAEL FARÍA BERMÚDEZ 117	
6.3.3	ZONA 3: EDIFICIO ADMINISTRATIVO CETA GENERAL LEONARDO CANAL GONZÁLES	119
6.3.4	ZONA 4: EDIFICIO JORGE ELIECER GAITÁN DURÁN	121
6.3.5	ZONA 5: VÍA BUCARAMANGA.....	124
6.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	126
6.4.1	ANÁLISIS PARA LA ZONA 1 CANCHA DE FÚTBOL ALBERTO GONZALES.....	126
6.4.2	ANÁLISIS PARA LA ZONA 2 BIBLIOTECA PADRE JOSÉ RAFAEL FARÍA BERMÚDEZ	126
6.4.3	ANÁLISIS PARA LA ZONA 3 EDIFICIO ADMINISTRATIVO CETA GENERAL LEONARDO CANAL GONZÁLES.....	127
6.4.4	ANÁLISIS PARA LA ZONA 4 EDIFICIO JORGE ELIECER GAITÁN DURÁN Y ZONA 5 VIA-BUCARAMANGA.....	128
	CONCLUSIONES.....	130
	BIBLIOGRAFÍA.....	132
	ANEXOS	135
	ANEXO 1. EVIDENCIA DE LA TOMA DE DATOS REALIZADA EN CAMPO..	135

INDICÉ DE FIGURAS

Figura 1. Ondas de cuerpo. (a) ondas P (primarias). (b) ondas S (secundarias)...	28
Figura 2. Ondas de Rayleigh.	30
Figura 3. Ondas Love.	30
Figura 4. Principio de Huygens	31
Figura 5. Ley de Snell.....	32
Figura 6. Modelo de dos capas, la inferior de mayor velocidad.....	34
Figura 7. Propagación de las ondas en un medio de dos capas.	34
Figura 8. Ángulo crítico de Refracción, (i_c).....	35
Figura 9. Registro típico sísmico.....	37
Figura 10. Curva tiempo distancia con disparo directo y reverso.	37
Figura 11. Elementos de la gráfica tiempo-distancia para la aplicación del método del tiempo de intercepción.	39
Figura 12. Modelo de dos capas con contactos inclinados.	42
Figura 13. Estratos inclinados de dos capas.....	45
Figura 14. Reflexiones sísmicas.	47
Figura 15. Diagrama de reflejo de punto medio común.....	49
Figura 16. Apilamiento de trazas en un punto medio común CMP.....	50
Figura 17. Representación de análisis de velocidades mediante la técnica de semblanza.	51
Figura 18. Trayectoria de rayos reflejados para una y múltiples capas.	52
Figura 19. Arreglo sísmico para MASW.....	58
Figura 20. Curva de dispersión.	59
Figura 21. Modelo de velocidad de onda S.....	60
Figura 22. Proceso de los registros de ReMi.	62
Figura 23. Ubicación de la Universidad de Pamplona.	69
Figura 24. Zonas de caracterización.	70
Figura 25. Medición con nivel topográfico.....	72
Figura 26. Tendido sísmico Refracción y Reflexión.	76
Figura 27. Tendido sísmico (MASW).	76
Figura 28. Tendido sísmico ReMi.	77
Figura 29. Adquisición en campo zona 1.	77
Figura 30. Adquisición de datos en campo zona 2.....	78
Figura 31. Adquisición de datos en campo zona 3.....	78
Figura 32. Adquisición de datos en campo zona 4.....	79
Figura 33. Adquisición de datos en campo zona 5.....	79
Figura 34. Picado con Pickwin.....	83
Figura 35. Determinación de capas.	84

Figura 36. Modelo 1, línea completa cancha de fútbol Alberto Gonzales.	84
Figura 37. Modelo inicial: Modelo 2, línea completa cancha de fútbol Alberto Gonzales.	85
Figura 38. Inversión del modelo inicial de la línea completa cancha de fútbol Alberto Gonzales.	85
Figura 39. Trazado de rayos al modelo invertido de la línea completa de la cancha de fútbol Alberto Gonzales.	86
Figura 40. Curva de tiempos observados y calculados.	86
Figura 41. Dato de ondas superficiales obtenidos.	87
Figura 42. Velocidad de fase- frecuencia.	88
Figura 43. Curva de dispersión.	88
Figura 44. Modelo inicial de velocidad de onda S para MASW.	89
Figura 45. Modelo de velocidad de onda S (V_s).	89
Figura 46. Datos crudos línea 1 MASW y ReMi.	90
Figura 47. Dominio de la Frecuencia línea 1 MASW y ReMi.	90
Figura 48. Dominio del tiempo línea 1 MASW y ReMi.	91
Figura 49. Geometría espacial línea MASW y ReMi.	91
Figura 50. Curva frecuencia-velocidad de Fase línea 1 MASW y ReMi.	92
Figura 51. Curva de dispersión línea 1 MASW y ReMi.	92
Figura 52. Modelo inicial de Velocidades de onda S para ReMi.	93
Figura 53. Curva de dispersión con error RMSE antes de la inversión línea 1 MASW y ReMi.	93
Figura 54. Modelo final de velocidades de onda S para ReMi.	94
Figura 55. Perfil del subsuelo zona 1 con trayectoria de rayos y velocidades de onda P.	97
Figura 56. Perfiles de velocidades de onda S en la zona 1.	97
Figura 57. Perfil del subsuelo zona 2 con trayectoria de rayos y velocidades de onda P.	99
Figura 58. Perfiles de velocidades de onda S en la zona 2.	99
Figura 59. Perfil del subsuelo zona 3 con trayectoria de rayos y velocidades de onda P.	100
Figura 60. Perfiles de velocidades de onda S en la zona 3.	101
Figura 61. Perfil del subsuelo zona 4 con trayectoria de rayos y velocidades de onda P.	102
Figura 62. Perfiles de velocidades de onda S en la zona 4.	102
Figura 63. Perfil del subsuelo zona 5 con trayectoria de rayos y velocidades de onda P.	104
Figura 64. Perfiles de velocidades de onda S en la zona 5.	104
Figura 65. Refracción para la zona 1.	115
Figura 66. MASW para la zona 1 correspondiente a la toma 1, línea 1.	115
Figura 67. MASW para la zona 1 correspondiente a la toma 2, línea 1.	116
Figura 68. MASW para la zona 1 correspondiente a la toma 3, línea 1.	116
Figura 69. MASW para la zona 1 correspondiente a la toma 1, línea 2.	116
Figura 70. MASW para la zona 1 correspondiente a la toma 2, línea 2.	117
Figura 71. MASW para la zona 1 correspondiente a la toma 3, línea 2.	117

Figura 72. Refracción sísmica para la zona 2.	118
Figura 73. MASW para la zona 2 correspondiente a la toma 1, línea 1.....	118
Figura 74. MASW para la zona 2 correspondiente a la toma 2, línea 1.....	119
Figura 75. MASW para la zona 2 correspondiente a la toma 3, línea 1.....	119
Figura 76. Refracción sísmica para la zona 3.	120
Figura 77. MASW para la zona 3 correspondiente a la toma 1, línea 1.....	120
Figura 78. MASW para la zona 3 correspondiente a la toma 2, línea 1.....	120
Figura 79. MASW para la zona 3 correspondiente a la toma 3, línea 1.....	121
Figura 80. Refracción sísmica para la zona 4 línea 1.....	121
Figura 81. MASW para la zona 4 correspondiente a la toma 1, línea 1.....	122
Figura 82. MASW para la zona 4 correspondiente a la toma 2, línea 1.....	122
Figura 83. MASW para la zona 4 correspondiente a la toma 3, línea 1.....	122
Figura 84. Refracción sísmica para la zona 4 línea 2.....	123
Figura 85. MASW para la zona 4 correspondiente a la toma 1, línea 2.....	123
Figura 86. MASW para la zona 4 correspondiente a la toma 2, línea 2.....	123
Figura 87. MASW para la zona 4 correspondiente a la toma 3, línea 2.....	124
Figura 88 Refracción sísmica para la zona 5.	124
Figura 89. MASW y ReMi para la zona 5 correspondiente a la toma 1, línea 1... 125	
Figura 90. MASW y ReMi para la zona 5 correspondiente a la toma 1, línea 2... 125	
Figura 91. Análisis patológico zona 1 cancha de fútbol Alberto Gonzales.....	126
Figura 92. Análisis patológico zona 2 Biblioteca Padre José Rafael Faría Bermúdez	127
Figura 93 Análisis patológico zona 3 Edificio Administrativo Ceta General Leonardo Canal Gonzáles.	128
Figura 94. Análisis patológico zona 4 Edificio Jorge Eliecer Gaitán Durán y zona 5 Vía-Bucaramanga.....	129
Figura 95. Evidencia toma de datos para la zona 1.	135
Figura 96. Evidencia toma de datos para la zona 2.	136
Figura 97. Evidencia toma de datos para la zona 3.	137
Figura 98. Evidencia toma de datos para la zona 4.	138
Figura 99. Evidencia toma de datos para la zona 5.	139
Figura 100. Evidencia 1.	140
Figura 101. Evidencia 2.	141
Figura 102. Evidencia 3.	142
Figura 103. Evidencia 4.	143
Figura 104. Esquema localización de las carpetas por zona.....	144
Figura 105. Métodos realizados en la zona 5.....	144
Figura 106: Esquema de ubicación de las carpetas según el tipo de datos.	144
Figura 107. MASW por zona.....	145
Figura 108. Esquema por toma.....	145
Figura 109. Datos MASW-ReMi.....	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de velocidades de onda P (V_p).....	27
Tabla 2. Velocidades de onda S (V_S).....	29
Tabla 3. Parámetros de adquisición de análisis típico de MASW.....	56
Tabla 4. Parámetros de adquisición en ReMi.....	61
Tabla 5. Factor de seguridad n	64
Tabla 6. Coeficientes de Poisson.....	65
Tabla 7. Equipos topográficos.....	71
Tabla 8. Equipos de exploración sísmica.....	72
Tabla 9. Características de las zonas.....	75
Tabla 10. Parámetros de adquisición para Refracción y Reflexión.....	80
Tabla 11. Parámetros de adquisición para ReMi.....	81
Tabla 12. Módulos de SeisImagen utilizados para Refracción Sísmica.....	83
Tabla 13. Módulos de SeisImager utilizados para MASW.....	87
Tabla 14. Caracterización de la zona 1.....	98
Tabla 15. Caracterización de la zona 2.....	99
Tabla 16. Caracterización de la zona 3.....	101
Tabla 17. Caracterización de la zona 4.....	103
Tabla 18. Caracterización de la zona 5.....	105
Tabla 19. Parámetros dinámicos del suelo para la zona 1.....	106
Tabla 20. Parámetros dinámicos del subsuelo para la zona 2.....	107
Tabla 21. Parámetros dinámicos del subsuelo para la zona 3.....	109
Tabla 22. Parámetros dinámicos de subsuelo para la zona 4 Línea 1.....	110
Tabla 23. Parámetros dinámicos de subsuelo para la zona 4 Línea 2.....	112
Tabla 24. Parámetros dinámicos de subsuelo para la zona 5.....	113

INTRODUCCIÓN

La exploración geofísica es actualmente utilizada en la ingeniería civil ya que por medio de estos métodos es posible obtener la caracterización del subsuelo a grandes y pequeñas longitudes y profundidades considerables.

Los métodos de exploración sísmica se dividen en dos grupos, métodos de fuente activa como la Refracción sísmica, Reflexión sísmica y MASW, los dos primeros métodos son los más antiguos, ya que son empleados para la localización de hidrocarburos, estos métodos se fundamentan en las leyes físicas que rigen la óptica. El segundo grupo es de fuentes pasivas, es decir generadas culturalmente (tráfico vehicular, trenes, industrias) y naturalmente (sismos, terremotos, movimientos de mareas) uno de los métodos que trabaja con este tipo de fuente es el método de refracción por micro-tremores (ReMi). En esta investigación se estudiarán e implementarán los métodos anteriormente mencionados, con el fin de caracterizar las zonas de interés.

En Colombia la normativa que rige la construcción de obras civiles es el Reglamento Colombiano Sismo Resistente (NSR-10), el cual especifica las condiciones mínimas con las que debe cumplir el conjunto suelo-estructura para garantizar la sismo-resistencia de las obras civiles. En la Universidad de Pamplona se observan fallas en algunas zonas, por tal motivo esta investigación se desarrolló en las siguientes zonas de estudio: zona 1 Cancha de fútbol Alberto Gonzales, zona 2 Biblioteca Padre José Rafael Faría Bermúdez, zona 3 Edificio administrativo Ceta General Leonardo Canal Gonzáles, zona 4 Edificio Jorge Gaitán Durán y zona 5 vía Bucaramanga, las cuales presenta fallas debido a deslizamiento de laderas, asentamiento del subsuelo y demás.

Este trabajo contiene la caracterización del subsuelo mediante la aplicación de métodos geofísicos como refracción sísmica, reflexión sísmica, método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y método de refracción por micro-tremores (ReMi), donde los dos primeros métodos mencionados captan las señales de onda P y a partir de estas obtener la velocidad (V_p) y los dos restantes captan ondas superficiales de las cuales se puede obtener la velocidad de onda S (V_s). El valor de dichas velocidades es de suma importancia en la aplicación de la ingeniería civil, ya que con estos se pueden deducir características del subsuelo tales como: número de capas, espesores de los mismos, tipo de subsuelo y parámetros dinámicos como capacidad portante, módulo de Poisson, módulo de rigidez, densidad del terreno y módulo de Young. En base a estos parámetros se pueden determinar qué tan bueno o malo es el subsuelo presente en estas zonas y brindar una posible causa del porqué de dichas fallas.

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente trabajo se encuentra dividido en 7 capítulos, tal como se describe a continuación:

Capítulo 1: se presenta la descripción del proyecto, se definen los objetivos y la justificación del desarrollo de esta Tesis.

Capítulo 2: contiene la metodología a desarrollar en esta investigación.

Capítulo 3: describe todo lo pertinente a la teoría necesaria para comprender estos métodos.

Capítulo 4: se realiza el diseño de las líneas sísmicas se especifican los equipos a utilizar y posteriormente se desarrolla la adquisición de los datos.

Capítulo 5: se procesan los datos adquiridos en campo para cada método de acuerdo a la zona de estudio.

Capítulo 6: en este espacio se analizan e interpretan los resultados de las velocidades de las ondas P y S para posteriormente hallar los parámetros dinámicos del subsuelo. Se plantean los resultados obtenidos de cada una de las zonas de estudio y se muestran los perfiles 1D para las ondas S y 2D para las ondas P.

Finalmente se presentan las conclusiones generales acerca de la investigación realizada y futuras recomendaciones.

CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA, REFLEXIÓN SÍSMICA, MASW Y REMI EN DEPÓSITOS SUPERFICIALES Y ZONAS CRÍTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA.

Capítulo 1.

Descripción del Proyecto



1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La prospección sísmica es una rama de la geofísica, que se emplea actualmente en la ingeniería civil en la parte de la geotecnia, y es de gran utilidad ya que nos permite obtener una caracterización por medio de capas, conocer las propiedades dinámicas y mecánicas de la zona. La caracterización y propiedades se pueden obtener tanto en la fase de planeamiento de la obra como en el mantenimiento de la misma.

La Universidad de Pamplona presenta zonas críticas, en las cuales se aprecian fallas estructurales a causa de asentamiento del suelo y deslizamiento de laderas, dicha problemática conlleva a la realización de esta investigación, a fin de conocer las características del subsuelo en dichas zonas, mediante la aplicación de los métodos reflexión y refracción sísmica, método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y refracción por micro-tremores (ReMi).

La problemática se presenta en las siguientes áreas de la Universidad de Pamplona: cancha de fútbol Alberto Gonzales, Biblioteca Padre José Rafael Faría Bermúdez, edificio administrativo Ceta General Leonardo Canal Gonzáles, edificio Jorge Eliecer Gaitán Durán y vía Bucaramanga.

Con la necesidad de comprender el porqué de estas fallas y deslizamiento se plantea el desarrollo de esta investigación que a su vez brindan ventajas económicas y ambientales ya que no es necesario realizar excavaciones para conocerlas.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Con esta investigación se buscó determinar en número de capas superficiales, propiedades mecánicas y dinámicas del subsuelo en las zonas críticas y depósitos superficiales de la Universidad de Pamplona, mediante los métodos de reflexión y refracción sísmica, método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y refracción por micro-tremores (ReMi).

Estos métodos de exploración sísmica tienen su principio en la propagación de ondas elásticas y superficiales a través del terreno, que son generadas artificial y naturalmente, haciendo a estos métodos más viables en comparación con el estudio de suelos, que en determinadas ocasiones puede presentar inconvenientes a la hora de caracterizar el subsuelo ya que se limita a áreas reducidas, además este parte de la realización de apiques que generan gastos adicionales y alteraciones ambientales.



Las propiedades tales como velocidad sísmica para las ondas P y S, junto con los parámetros mecánicos y dinámicos obtenidas mediante estos métodos que son módulo de rigidez, capacidad portante del subsuelo, módulo de Young, módulo de Poisson y densidad del terreno, pueden ser utilizadas para una posible solución a las fallas existentes en las zonas de estudio. La determinación de estos parámetros es un aporte valioso para la Universidad de Pamplona, ya que reduciría costos al evitar estudios para obtenerlos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Caracterizar geofísicamente el subsuelo mediante las técnicas de refracción y reflexión sísmica, MASW y REMI en depósitos superficiales y zonas críticas de la Universidad de Pamplona.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar los fundamentos teóricos y prácticos de los métodos geofísicos tales como refracción sísmica, reflexión sísmica, MASW y ReMi.
- Aplicar las técnicas geofísicas mencionadas anteriormente para la adquisición de datos en las zonas de interés.
- Realizar un procesamiento para los datos adquiridos en cada una de las técnicas.
- Obtener perfiles de velocidad de ondas P y S para los materiales en la zona de interés.
- Realizar una interpretación geológica a los resultados obtenidos en el procesamiento de los datos.
- Establecer los parámetros dinámicos y mecánicos del subsuelo tales como, capacidad portante, módulo de Poisson, densidad del terreno y módulo de Young.

*CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO MEDIANTE LAS
TÉCNICAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA, REFLEXIÓN SÍSMICA, MASW Y
REMI EN DEPÓSITOS SUPERFICIALES Y ZONAS CRÍTICAS DE LA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA.*

Capítulo 2. Metodología.



2 METODOLOGÍA

La metodología que se realizó para este trabajo fue la siguiente.

- **Revisar los fundamentos teóricos y prácticos de los métodos geofísicos tales como refracción sísmica, reflexión sísmica, MASW y ReMi.**

Para este propósito fue necesario hacer un barrido bibliográfico acerca de los diferentes métodos, estudios y antecedentes que rigen dichas técnicas.

- **Aplicar las técnicas geofísicas mencionadas anteriormente para la adquisición de datos en las zonas de interés.**

Como primera medida se gestionaron los respectivos permisos para el préstamo de los equipos pertinentes y así llevar a cabo estos métodos.

Para la aplicación de estos métodos se necesitó de un equipo topográfico (nivel), un geode de 24 canales (o 24 geófonos), computador portátil, mazo de 16 lb y una placa metálica. Para la toma de datos usando los métodos de refracción y reflexión sísmica los geófonos que se utilizaron trabajaron con frecuencias de 14 Hz, por otra parte, para los métodos MASW y ReMi la frecuencia empleada fue de 4,5 Hz. Los geófonos se ubicaron en línea recta con una distancia conocida entre si alineados con la fuente, el nivel o equipo topográfico brindaron la altura con respecto al nivel del mar de cada uno de los geófonos.

En los métodos de refracción sísmica, reflexión sísmica y MASW se generaron ondas mecánicas artificialmente mediante el golpe de un mazo sobre una placa metálica. Para el desarrollo del método ReMi los geófonos captaron las ondas inducidas por las vibraciones que generó el tráfico vehicular durante 10 minutos. Este método permitió conocer los tiempos de llegada de las diferentes ondas.

- **Realizar un procesamiento para los datos adquiridos en cada una de las técnicas.**

El procesamiento de los datos obtenidos se realizó a través del software SeisImager de la empresa Geometrics, el cual contiene módulos para procesar los datos obtenidos a partir de las diferentes técnicas (refracción sísmica, MASW y ReMi). Para reflexión sísmica se empleó el software Seismic unix (CWP).



- **Obtener perfiles de velocidad de onda P y S para los materiales en la zona de interés.**

Con el procesamiento anterior se determinaron los perfiles con el número de capas presentes en el subsuelo, profundidad alcanzada y los valores de velocidad de las ondas P y S.

- **Realizar una interpretación geológica a los resultados obtenidos en el procesamiento de los datos.**

Con la obtención de las velocidades V_p y V_s , se clasificaron los materiales según estas velocidades y se obtuvo el tipo de suelo que se presenta en la zona de estudio.

- **Establecer los parámetros dinámicos y mecánicos de los suelos tales como, capacidad portante, módulo de Poisson, densidad y módulo de Young.**

Conociendo los valores de la velocidad de cizalla V_s para los posibles medios y mediante fórmulas ya establecidas se determinaron las diferentes características mecánicas y dinámicas de las zonas de estudio.

*CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO MEDIANTE LAS
TÉCNICAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA, REFLEXIÓN SÍSMICA, MASW Y
REMI EN DEPÓSITOS SUPERFICIALES Y ZONAS CRÍTICAS DE LA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA.*

Capítulo 3. Métodos Sísmicos.

3 MÉTODOS SÍSMICOS

En este capítulo se expone una breve historia sobre la exploración sísmica, los principios que la fundamenta y se explicará cada uno de los métodos de estudio en este trabajo de investigación.

3.1 ESTADO DEL ARTE

La sísmica data desde el año 132 D.C, donde el chino Chang Heng creo el primer sismoscopio, un elemento novedoso capaz de captar la llegada de las ondas sísmicas y con esto permitió conocer su dirección de propagación desde donde se generan. El sismoscopio fue creado con el fin de dar una explicación a los fenómenos físicos que daban origen a los terremotos, puesto que en esa época se creía que los terremotos eran un castigo divino.¹

La sísmica basa su principio en el concepto de rayo donde se observó que al incidir un rayo sobre una superficie parte de la energía era reflejada y parte era refractada, por el cambio de medio según el principio de Huygens en el año 1655.

En 1678 se enuncia la Ley de elasticidad de Hooke y con esto nace el desarrollo de la teoría sísmica, años después Robert Mallet en 1845 a través de terremotos artificiales generados por el uso de pólvora negra como fuente de energía y recipientes de mercurio como receptores, de esta manera se intentó hacer las primeras mediciones de las velocidades sísmicas que se transmiten a través del terreno.

La teoría sísmica de reflexión y refracción fue establecida por Knott en 1899. La sísmica de reflexión tuvo sus primeras aplicaciones en áreas marítimas que fueron desarrolladas por el canadiense Reginald Fessenden en 1913, donde esta técnica era utilizada con el fin de detectar icebergs, pero solo hasta 1927 la sísmica de reflexión se convierte en una técnica comercial de exploración geofísica. Estas dos técnicas se basan en la obtención de las velocidades de las ondas primarias o compresionales (V_p), las cuales permiten obtener perfiles del subsuelo.

Años atrás en 1919 Ludger Mindtrop aplicó a una patente sobre el método de refracción, pero fue hasta el año 1930 donde se aplicó este método descubriendo domos salinos superficiales.²

Más tarde en 1940 aproximadamente, se inició la aplicación de métodos de perfiles continuos, es decir, para cada uno de los puntos de emisión hay varios puntos de

¹ LOWRIE, William. Fundamentals of Geophysics. Zürich: Cambridge, 2007, p.121.

² GAYÁ FLOREZ, María Antoni. Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en el Complejo de Turbidítico en Ainsa (Huesca). Huesca España, 2004, p.7-8. Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Catalunya.

recepción hacia delante y hacia atrás, generando una serie de datos cercanos y continuos a lo largo de una línea sísmica.³

El procesamiento de los datos fue introducido por Rieber en 1939, usando una grabación de densidad variable y foto celdas para la reproducción de las trazas sísmicas. En 1953 las cintas magnéticas se hicieron comercialmente disponibles, dando paso al inicio de procesamiento de datos.

Desde la década de 1960 estos métodos se han desarrollado con éxito. Con el auge de las tecnologías informáticas se ha ido avanzando año tras año, hasta llegar al desarrollo de métodos que nos brindan información para determinar propiedades mecánicas y dinámicas del subsuelo.⁴

En el siglo XX cuando Jones 1961 y otros investigadores utilizaron pequeños vibradores como ondas experimentando un auge a mediados de la década de 1980 cuando los computadores digitales se hicieron populares. El método de análisis espectral de ondas superficiales (SASW) se caracterizó por implementar dos receptores que se desplazaban a lo largo del tendido sísmico. Este método es el antecesor para el método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) el cual utiliza múltiples receptores.

En 1999 se introdujo por primera vez en la geofísica el método de análisis multicanales de ondas superficiales (MASW), el cual brinda información necesaria para hallar la velocidad de onda de corte o de cizalla (V_s), este dato es indispensable para la determinación de características del subsuelo tales como densidad, rigidez, esfuerzo cortante, capacidad portante entre otros.⁵

Las primeras aplicaciones teóricas datan desde siglo XX, este tipo de ondas han sido utilizadas en diversos estudios tale como estudios geotécnicos y de sismología, incluso se han elaborado estudio para diferentes aplicaciones médicas.

Los estudios nombrados anteriormente han sido desarrollados por los siguientes autores: Gutenberg, 1924; Evison 1959; Viktorov, 1967; McMechan y Yedlin, 1981; Kovach, 1978; Roesset, 1998; Stokoe, 1988; Stokoe y Santamarina, 2000; Jørgensen y Kundu, 2002; O'Neill., 2003; 2004; Gaherty, 2004; Pedersen ,2006; Luo 2007; O'Connell y Turner, 2011; Prodehl ,2013).⁶

³ SLIDESHARE, Adquisición Sísmica de Reflexión, 2013, <http://es.slideshare.net/diegillo13/adquisicin-ssmica-de-reflexin> [Consulta: Jueves, 3 de marzo de 2016].

⁴ GAYÁ FLOREZ, María Antoni. Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en el Complejo de Turbidítico en Ainsa (Huesca). Huesca España, 2004, p.8. Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Catalunya.

⁵ MASW, Análisis Multicanal De Ondas Superficiales, 2009, <http://masw.com/WhatisMASW.html> [Consulta: Miércoles, 2 de marzo de 2016].

⁶ DAL MORO, Giancarlo. Surfase Wave Analisis for Near Surfase Applications. Italia:Elsevier,2015,pág.1.



Con el avance urbanístico de las ciudades modernas los métodos anteriormente mencionados se ven limitados, debido al ruido excesivo causado por el tráfico, industrias, maquinaria entre otros. Debido a esto surge la necesidad de implementar un método en el que sus resultados no se vean afectados por las condiciones modernas.

Por tal motivo el método de refracción por micro-tremores (ReMi) es el actualmente utilizado en ambientes urbanos ya que su función se basa en captar las ondas de vibración causadas naturalmente. Este método al igual que el método MASW basan su funcionamiento en la obtención de las ondas superficiales.⁷

De acuerdo a lo descrito anteriormente y para comprender cada uno de los métodos, a continuación, se dará una breve descripción de los fundamentos teóricos de las ondas de cuerpo y ondas superficiales.

3.2 GENERALIDADES DE LOS MÉTODOS SÍSMICOS

Para comprender los métodos tratados en esta investigación se hará un breve recorrido por algunas de las bases teóricas acerca de las ondas y leyes que son aplicadas.

3.2.1 ONDAS SÍSMICAS

Existen dos tipos de onda mecánicas, las que se propagan en el interior del subsuelo que se conocen como ondas de cuerpo y las que se propagan a lo largo de las partes poco profundas conocidas como ondas superficiales.

Se denomina ondas de cuerpo a las ondas compresionales o de presión (P) y ondas de corte o de cizalla (S), mientras que las ondas superficiales son las que se conocen como ondas de Rayleigh (R) y ondas Love (L).

A continuación, se describen brevemente cada una de las ondas anteriormente mencionadas.

⁷ INGEOSOLUM, Refracción Sísmica Integrada Con Micro-tremor, 2011, <http://ingeosolum.blogspot.com.co/2011/12/refraccion-sismica-integrada-con.html> [Consulta: Jueves, 3 de marzo de 2016].

3.2.1.1 ODAS DE CUERPO

Las ondas de cuerpo son aquellas que generan cambios de volumen, estas se propagan a través del interior de la tierra y siguen trayectorias curvas debido a la densidad, rigidez y elasticidad del medio entre otros.⁸

Ondas compresionales o primarias (P)

Las ondas primarias (P), son aquellas que al desplazarse comprimen y dilatan las partículas de subsuelo generando cambios de volumen como se muestra en la figura 1 (a).

Estas ondas se propagan a mayor velocidad, por esta razón son las que primero captan los geófonos, éstas tienen la facilidad de propagarse por cualquier tipo de material sea sólido, líquido o gas.⁹ Las ondas P son de periodos más cortos; es decir las ondas P son de frecuencias más altas.

En la tabla 1 se especifican algunos valores de velocidad de onda P, (V_p) para diferentes materiales.

Tabla 1. Tabla de velocidades de onda P (V_p).¹⁰

MATERIALES	VELOCIDADES
SUELOS Y ROCAS NATURALES	m/s
Material superficial meteorizado	240 - 610
Grava o arena seca	460 - 915
Arena (saturada)	1220 - 1830
Arcilla (saturada)	915 - 2750
Agua	1430 - 1665
Agua de mar	1460 - 1525
Arenisca	1830 - 3960
Esquisto	2750 - 4270
Tiza	1830 - 3960
Caliza	2134 - 6100
Granito	4575 - 5800
Roca metamórfica	3050 - 7000

Fuente: Norma ASTM D5777 Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation, Pág. 5.

⁸ SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA SISMICA, Tipos De Ondas, Ondas De Cuerpo, <http://www.smis.org.mx/htm/sismos.htm> [Consulta: Jueves, 3 de marzo de 2016].

⁹ SISMOCLUB, Ondas De Cuerpo P y S, 2011 <http://sismoclub2011-1.wikispaces.com/Ondas+de+Cuerpo> [Consulta: Jueves, 3 de marzo de 2016].

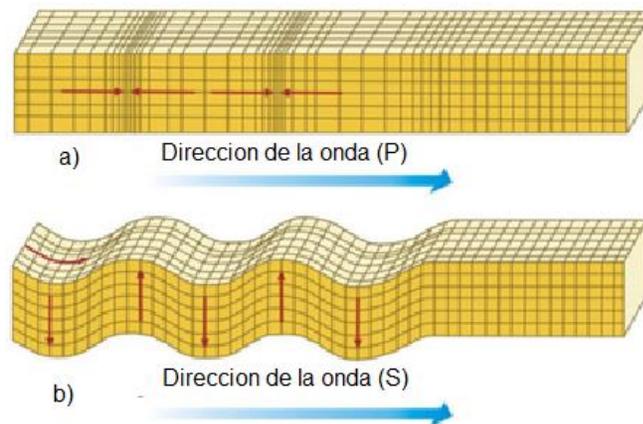
¹⁰ : Norma ASTM D5777 Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation, Pág. 5.

Ondas de corte o de cizalla (S)

Las ondas (S), son aquellas en las que el subsuelo se desplaza perpendicularmente a la dirección de propagación, como se muestra en la figura 1(b).

Se les llaman secundarias ya que se propagan a menor velocidad respecto a la onda P, su amplitud es mayor, debido a eso genera grandes destrucciones cuando se presentan terremotos. En los fluidos (líquidos y gases) la onda S no se propaga ya que estos medios no resisten esfuerzos cortantes.¹¹

Figura 1. Ondas de cuerpo. (a) ondas P (primarias). (b) ondas S (secundarias).



Fuente: <http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/> tomada y modificada.

En la tabla 2 se especifican algunos valores de velocidad de onda S (V_S) para diferentes materiales.

¹¹ SISMOCLUB, Ondas De Corte o Secundarias, 2011 <http://sismoclub2011-1.wikispaces.com/Ondas+de+Cuerpo> [Consulta: Jueves, 3 de marzo de 2016].

Tabla 2. Velocidades de onda S (V_s).¹²

MATERIALES	Vs(m/s)
Material superficial y suelos incompetentes	50 - 150
Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)	150 - 350
Suelos muy competentes y gravas	350 - 600
Roca erosionada	600 - 800
Roca sólida	> 800

Fuente: DAL MORO, Giancarlo. Surface Wave Analysis for Near Surface Applications. Italia: Elsevier, 2015, pág.18, tomada y modificada.

3.2.1.2 ONDAS SUPERFICIALES

Son aquellas que se propagan en la superficie del subsuelo, su desplazamiento es más lento que la onda S y su amplitud disminuyen con la profundidad.

Ondas de Rayleigh

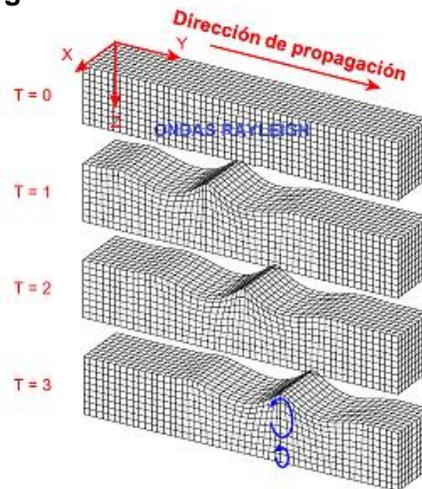
Las ondas de Rayleigh fueron descritas matemáticamente en 1885, estas se producen tanto en el plano vertical como en el horizontal. Dichas ondas se presentan con un movimiento elíptico retrograda (ver figura 2), las cuales contiene una componente de corte, por tal motivo se propagan en medios sólidos.

Estas ondas se conocen como ondas destructivas debido a que una de las principales características de estas, es que son de gran amplitud y al propagarse causan daños en las estructuras, por otro lado, estas también contienen bajas velocidades y frecuencias.¹³

¹² DAL MORO, Giancarlo. Surface Wave Analysis for Near Surface Applications. Italia: Elsevier, 2015, p.18.

¹³ LINARES MOTENEGRO, Giselle Mercedes. Introducción y aplicación del método de sismica de microtemores en áreas urbanas. Sartenejas, Venezuela. Trabajo de grado. Universidad Simon Bolivar. 2005. Pág. 15.

Figura 2. Ondas de Rayleigh.

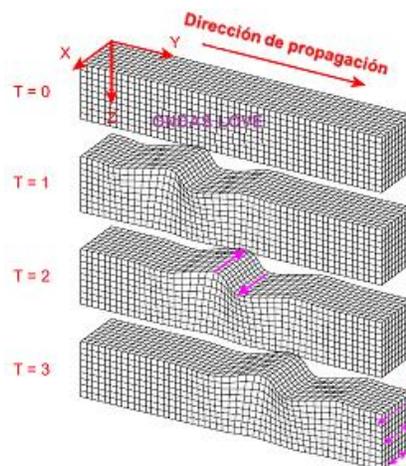


Fuente: DAL MORO, Giancarlo. Surface Wave Analysis for Near Surface Applications. Italia: Elsevier, 2015, pág.2, tomada y modificada.

Ondas Love

Las ondas Love fueron descritas por Augustus Edward Hough Love en 1911, son las ondas superficiales que se propagan con mayor velocidad, estas presentan un movimiento horizontal de corte normal a la dirección de propagación como se aprecia en la figura 3.¹⁴

Figura 3. Ondas Love.



Fuente: DAL MORO, Giancarlo. Surface Wave Analysis for Near Surface Applications. Italia: Elsevier, 2015, p.4. Y editada.

¹⁴ ¹⁴ CASALENA G. Mauro R. Caracterización geofísica del suelo somero mediante la aplicación del método de refracción por microtremores (remi) en la ciudad de Maracay- estado Aragua. Caracas, Venezuela. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. 2011. Pág. 22.

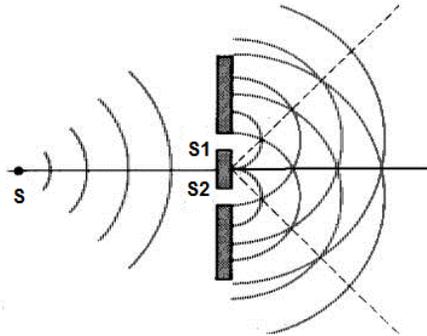
3.2.1.3 PRINCIPIO DE HUYGENS

El principio del físico holandés Christian Huygens (1678), se basa en la propagación de un proceso ondulatorio en un medio, se realiza mediante el concepto de frente de onda, donde todos sus puntos son fuentes de perturbación, los cuales dan origen a nuevos procesos ondulatorios. Cada uno de los nuevos procesos forma un nuevo frente de onda y así sucesivamente¹⁵.

En un medio homogéneo los nuevos frentes de ondas son esféricos para cualquier instante t . En medios no homogéneos cada elemento del frente de onda es paralelo en un lapso de tiempo Δt , pero con velocidades diferentes lo que hace que el nuevo frente de onda no sea paralelo al frente de onda inicial.¹⁶

En la figura 4 se observa como el frente de onda generada en el punto S, incide en otros medios puntuales S1 y S2 en los cuales se producen dos nuevos procesos ondulatorios que conforman un nuevo frente de onda.

Figura 4. Principio de Huygens



Fuente: <http://ondas.galeon.com/enlaces2685337.html>

3.2.1.4 LEY DE SNELL

La Ley de Snell se basa en la incidencia de un rayo en un cambio de medio donde se presentan los procesos de reflexión y refracción.

En la figura 5 se puede observar la presencia de dos medios con propiedades elásticas diferentes, la energía del rayo que incide en el medio con velocidad n_1 y con ángulo i_1 , parte de esta energía es reflejada conservando el mismo ángulo de

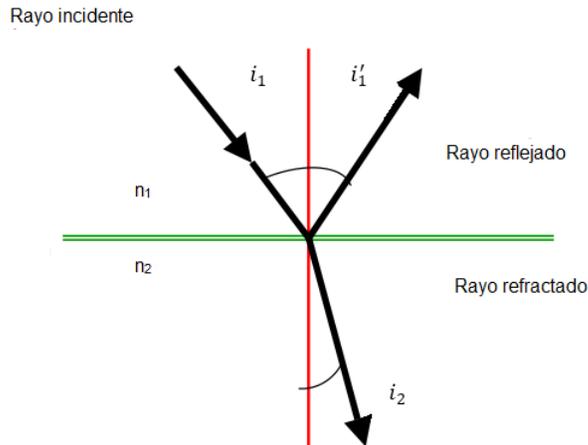
¹⁵ SARRIA, Alberto. Métodos geofísicos con aplicaciones en la ingeniería civil. Bogotá: Uniandes, 1948, Pag.107.

¹⁶ ROSALES CLIMENT, Cristina Isabel. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia, Trabajo de grado. Universidad del Valle. 2001, p.23

incidencia y parte es refractada en el medio con velocidad n_2 y con un ángulo i_2 .¹⁷ Partiendo de este fenómeno físico se formula la siguiente ecuación:

$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Figura 5. Ley de Snell



Fuente: <http://fibroanestesia.com/wp-content/uploads/2011/12/Modulo-5.Capitulo-1.Figura-3.png>

El ángulo de incidencia i_2 que es medido respecto a la normal se refracta a 90° con respecto a esta, de tal manera que:

$$\text{sen}(i_2) = \text{sen}(90^\circ) = 1 \quad (\text{Ecuación 2})$$

De esta manera el ángulo crítico queda definido en términos de las velocidades de los medios así:

$$\text{sen}(i_c) = \frac{n_1}{n_2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

¹⁷ LOPEZ AVALOS, *et al.* aplicación del método de Refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P. San Salvador, El Salvador. Trabajo de grado. Universidad de El Salvador. 2008, pág. 35.



3.2.1.5 PRINCIPIO DE FERMAT

El principio de Fermat se basa en el tiempo mínimo de trayectoria del rayo que se propagan de un lugar a otro, lo cual no indica que la distancia de la trayectoria recorrida sea la mínima.¹⁸

3.3 MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA

La refracción sísmica es una técnica que se desarrolló para la exploración petrolera, hoy en día esta técnica es aplicada a diferentes disciplinas tales como la minería, la hidrogeología y obras civiles.

En la ingeniería civil es utilizada para caracterizar el subsuelo, obteniendo propiedades físicas del mismo, para elaborar el diseño de cimentaciones.

Esta técnica de exploración sísmica, consiste en registrar la propagación de las ondas P y S en el subsuelo, determinando así parámetros mecánicos y dinámicos como el módulo de Young, modelo de Poisson, densidad del terreno, capacidad portante entre otros.

El conocimiento de estas propiedades se obtiene mediante equipos geofísicos, los cuales permiten realizar registros en el lugar de interés y así obtener esta información en un menor tiempo, sobre todo si se quieren caracterizar terrenos, este método permite la visualización preliminar e inmediata de los perfiles del subsuelo.¹⁹

El método de refracción sísmica se basa en el tiempo de propagación de las ondas elásticas en el terreno, las cuales son generadas en la superficie y transmitidas en el subsuelo, al incidir en un límite a través del cual hay un contraste en la velocidad, entonces se genera un cambio en la dirección del desplazamiento de la onda, este hace que estas ondas sean refractadas y lleguen a un punto en la superficie donde son captadas por los receptores (geófonos). Este método tiene como característica la obtención de perfiles del subsuelo horizontalmente más largos.

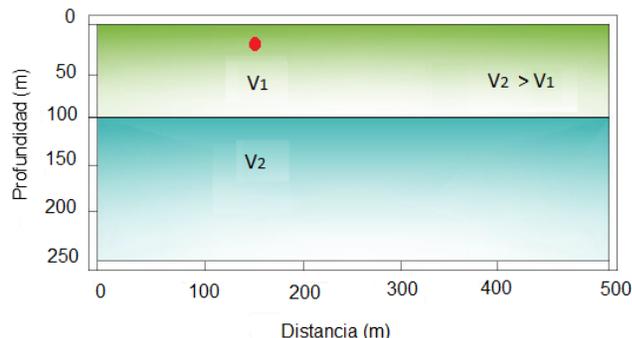
En esta sección se hará énfasis en la ley de refracción o ley de Snell.

Para explicar la trayectoria de la onda en el método de refracción sísmica, se considera un medio con dos capas de subsuelo de diferentes velocidades, en la capa uno con velocidad V_1 y en la capa dos con velocidad V_2 , siendo V_2 mayor que V_1 , ($V_2 > V_1$), como se observa en la figura 6.

¹⁸ LOPEZ AVALOS, *et al.* aplicación del método de Refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P. San Salvador, El Salvador. Trabajo de grado. Universidad de El Salvador. 2008, pág. 40.

¹⁹ COMISION NACIONAL DEL AGUA. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. México 2007, pág. 31.

Figura 6. Modelo de dos capas, la inferior de mayor velocidad.

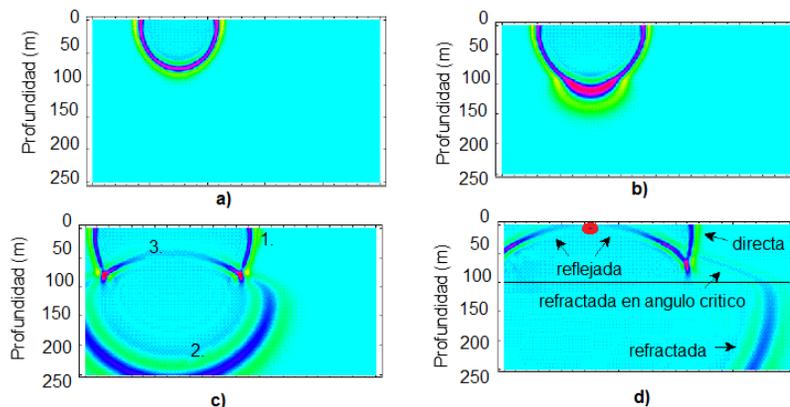


Fuente: LOPEZ AVALOS, *et al.* Aplicación del método de Refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P. San Salvador, El Salvador. Trabajo de grado. Universidad de El Salvador. 2008, pág. 42.

Una vez se generan las ondas en la fuente, estas empiezan su trayectoria en la capa superior, formando un frente de onda en el espacio (ver figura.7).

Se hace un corte vertical por la fuente, el frente de onda lucirá como se aprecia en la figura 7(a), este frente de onda se conoce como frente de onda directa. En la parte (b) de la figura 7, el frente de onda se ha encontrado con el límite de los medios y ocurren las primeras refracciones hacia la capa inferior. En la parte (c), ha transcurrido más tiempo y se pueden observar claramente 3 frentes de onda: **(1)** de la onda directa; **(2)** de la onda refractada hacia la capa inferior, y **(3)** de la reflejada hacia la capa superior. Al observar en detalle puede identificarse un cuarto frente de onda, este frente de onda está más alejado del punto disparo que el frente de onda directa en la primera capa, por lo que llegará más rápido a los geófonos donde aún no había llegado el frente de onda directa.

Figura 7. Propagación de las ondas en un medio de dos capas.

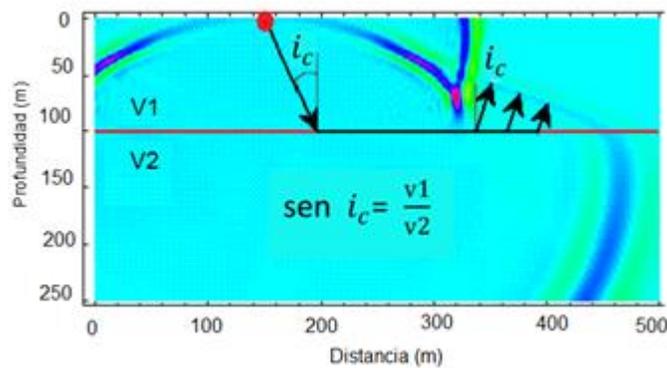


Fuente: ROSALES CLIMENT, Cristina Isabel. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia, 2001, p.105. Trabajo de grado. Universidad del Valle.

El frente de onda refractada hacia el medio superior se genera cuando los rayos provenientes de la fuente alcanzan un ángulo crítico, i_c , la interface entre los medios. Como se explicó, el ángulo refractado tiene 90° con respecto a la normal, de tal manera que el $\text{Sen } i_2 = \text{Sen } 90^\circ = 1$.

La refracción a 90° del ángulo crítico, ilustrada en la figura 8, implica que la onda no se propaga por la capa inferior, sino por el contacto entre ambas capas, con la velocidad V_2 de la capa inferior, siguiendo la ley de los recorridos mínimos o Principio de Fermat.

Figura 8. Ángulo crítico de Refracción, (i_c).



Fuente: ROSALES CLIMENT, Cristina Isabel. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Trabajo de grado. Universidad del Valle. 2001, p.105.

3.3.1 ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO

En este método la onda inducida se genera artificialmente mediante el impacto que se produce en la superficie por el golpe de un mazo sobre una platina metálica, o con la detonación de explosivos.

El equipo de medición para la refracción sísmica lo componen los siguientes elementos²⁰:

- **Fuente generadora de onda sísmica:** Existen diferentes tipos de fuente generadora de ondas sísmicas mencionadas anteriormente, la selección de esta depende de la profundidad de investigación.

²⁰ ROSALES CLIMENT, Cristina Isabel. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Trabajo de grado. Universidad del Valle. 2001, p.107.

Lo que se busca con estos tipos de fuente es generar una onda producida por un único evento de duración instantánea evitando así la superposición de ondas, ya que de esta manera se puede controlar el tiempo de inicio y la localización de cada una de las perturbaciones generadas, las ondas sísmicas producidas será ondas elásticas y superficiales.

- **Receptores de vibraciones:** la recepción de estas vibraciones se lleva a cabo a través de geófonos, los cuales son transductores que convierten la energía mecánica manifestada por medio de pequeñas vibraciones del terreno en energía eléctrica, la cual es transmitida por un cable hasta el geode²¹. Estos geófonos se ubican en diferentes puntos a lo largo del tendido a distancias conocidas. En la actualidad se utilizan 12, 24 o 48 geófonos con frecuencias que oscilan entre 8 y 40 Hz.
- **Adquisición y almacenamiento:** la adquisición y almacenamiento de los datos se compone de las siguientes partes

1 Unidad de apilamiento y digitalización: corresponde a la unidad donde se adquieren, digitalizan y procesan los datos. Estas unidades reciben las señales captadas por cada uno de los geófonos, a cada geófono le corresponde un canal, estas señales se digitalizarán de acuerdo a los parámetros determinados por el usuario.

2 Cable sísmico: su función es llevar la señal desde los geófonos hasta la unidad de adquisición.

3 Trigger: cable que conecta la fuente con el equipo de adquisición de tal manera que en el instante en cual se genera la perturbación este activa el sistema de registro.

Según la longitud de la línea que se vaya a estudiar se espera alcanzar profundidades entre una tercera y cuarta parte de la longitud total de la línea. Luego de realizar el tendido sísmico en campo y obtener la información de las primeras llegadas de las ondas, con esta información obtenida se construyen las curvas de tiempo-distancia.

3.3.2 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE CURVAS TIEMPO-DISTANCIA

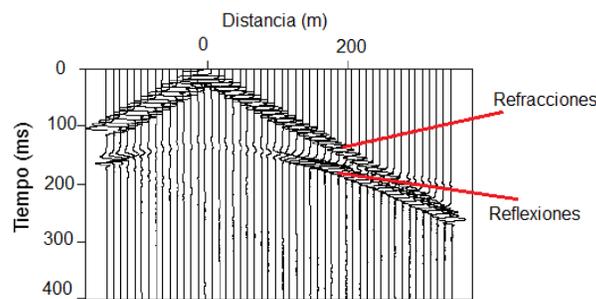
Las curvas de tiempo-distancia se obtienen con los primeros arribos de las ondas P a cada uno de los geófonos y las distancias que separan los geófonos de la fuente o punto de disparo.

²¹ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. México 2007, pág. 32.

Una vez las vibraciones han sido captadas por los geófonos y transmitidos a la unidad de adquisición, a través de un software se pueden observar los tiempos de llegada de la onda S, la distancia entre los geófonos y la fuente como se aprecia en la figura 9.

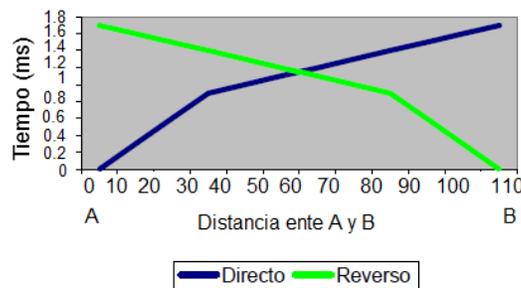
Para tener información más detallada del subsuelo, se realizan arreglos sísmicos de refracción de forma directa, reversa e intermedia. Para el tendido directo y reverso se ubica la fuente en el extremo de inicio y final de la línea sísmica respectivamente a una distancia conocida como se observa en la figura 10; para el arreglo intermedio por lo general la fuente es ubicada en el centro de la línea sísmica²².

Figura 9. Registro típico sísmico.



Fuente: ROSALES CLIMENT, Cristina Isabel. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Trabajo de grado. Universidad del Valle. 2001, p.109.

Figura 10. Curva tiempo distancia con disparo directo y reverso.



Fuente: ROSALES CLIMENT, Cristina Isabel. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Trabajo de grado. Universidad del Valle. 2001, p.109.

²² ROSALES CLIMENT, Cristina Isabel. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Trabajo de grado. Universidad Del Valle. 2001, p.103-107.



Con el análisis de las curvas tiempo-distancia se puede obtener:

- Numero de capas.
- Velocidades.
- Espesores de las capas.
- Geometría.

Las propiedades mecánicas y dinámicas del subsuelo se pueden obtener en base a los datos de velocidad de las ondas longitudinales y transversales de cada una de las capas, mediante la implementación de tablas estandarizadas descritas anteriormente²³.

3.3.3 MODELADO

Existen varios métodos de interpretación de las curvas tiempo-distancia los cuales se basan en número de capas, velocidades, espesores, comportamiento estructural.

Los métodos más utilizados para el modelado de las curvas tiempo-distancia son los siguientes:

- Método del tiempo de la intercepción.
- Método del tiempo de retraso.
- Método recíproco generalizado.
- Método por trazado de rayos.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se utilizó el método del tiempo de intercepción que se describe a continuación.²³

3.3.3.1 Método del tiempo de intercepción

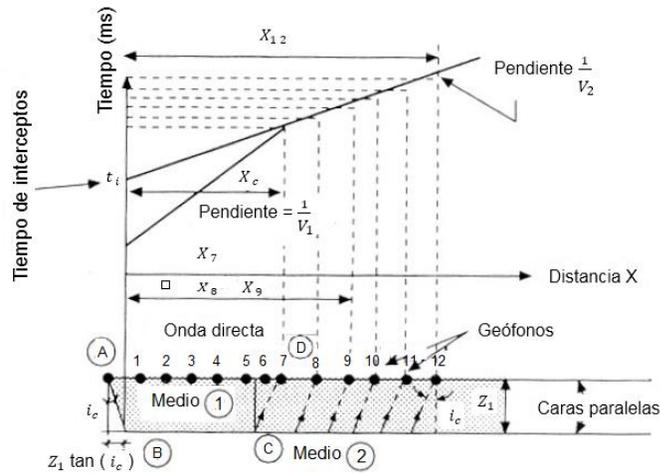
Este método utiliza los tiempos de los primeros arribos de la onda P, estos tiempos aumentan con la distancia y profundidad de penetración, el aumento de estos tiempos se implementa para determinar el espesor de las posibles capas. En el método del tiempo de intercepción se presenta dos casos: capas horizontales y capas inclinadas. A continuación, se desglosará brevemente cada uno de ellos.

- **Capas horizontales:** Existen dos tipos de estratificados horizontal, estratificado horizontal de dos capas y estratificado horizontal de las múltiples capas.

²³ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. México 2007, pág. 36-37.

En la figura 11 se observa un medio de propagación de onda P el cual contiene dos capas que presentan velocidades V_1 y V_2 respectivamente, donde la velocidad de la capa 1 debe ser menor que la velocidad de la capa 2²⁴.

Figura 11. Elementos de la gráfica tiempo-distancia para la aplicación del método del tiempo de intercepción.



Fuente: SARRIA, Alberto. Métodos geofísicos con aplicaciones en la ingeniería civil. Bogotá D.C.: Uniandes, 1948, Pag.169.

En la figura 11 se aprecia la ubicación de la fuente en el punto A la cual se encuentra alineada con los geófonos. En el punto A se genera la onda que se desplaza directa e indirectamente. El tiempo de propagación de la onda P refractada desde el punto A hasta D está dado por:

$$t_{ABCD} = t_{AB} + t_{BC} + t_{CD} \quad , \quad (\text{Ecuación 4})$$

La ubicación de los geófonos está a una distancia conocida del punto A los tiempos empleados por la onda para propaga desde A a cada uno de los geófonos se divide entre las respectivas distancias, este valor será el inverso de la velocidad de la capa que recorren es decir:

$$V_P = \frac{x}{t} \quad , \quad (\text{Ecuación 5})$$

entonces,

²⁴ SARRIA, Alberto. Métodos geofísicos con aplicaciones en la ingeniería civil. Bogotá D.C.: Uniandes, 1948, Pag.169.

$$\frac{1}{V_p} = \frac{t_p}{x} \quad , \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde:

V_p = velocidad de la onda P.

t_p = tiempo de viaje de la onda P.

La geometría del trayecto ABCD como la componente vertical del rayo incidente, AB, es igual al espesor del medio 1, Z_1 , y la componente horizontal es igual a $Z_1 \tan(i_c)$ y AB es igual que CD, entonces:

$$AB = CD = \frac{Z_1}{\cos(i_c)} \quad , \quad (\text{Ecuación 7})$$

y

$$BC = x - 2Z_1 \tan(i_c) \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde x es la distancia desde el punto A hasta D.

Por tanto, el tiempo de propagación de la onda P a lo largo de ABCD está dado por:

$$(t)_{ABCD} = \frac{AB+CD}{V_1} + \frac{BC}{V_2} \quad , \quad (\text{Ecuación 9})$$

reemplazando, las ecuaciones 7 y 8 en la ecuación 9, se llega a:

$$(t)_{ABCD} = \frac{2Z_1}{V_1 \cos(i_c)} + \frac{x - 2Z_1 \tan(i_c)}{V_2} \quad , \quad (\text{Ecuación 10})$$

aplicando la ley de Snell a la ecuación 10 se obtiene:

$$(t)_{ABCD} = \frac{2Z_1 \cos(i_c)}{V_1} + \frac{x}{V_2} \quad , \quad (\text{Ecuación 11})$$

En la ecuación 11 al hacer $x = 0$, lo que significa tomar la distancia vertical de propagación de la primera capa, de esta forma se obtiene el tiempo de intercepto t_i (ver figura 11). Según lo anteriormente descrito la ecuación se convierte en:

$$Z_1 = \frac{t_i V_1}{2 \cos(i_c)} \quad , \quad (\text{Ecuación 12})$$

aplicando nuevamente la ley de Snell a la ecuación 12, se tiene la profundidad de la capa uno:

$$Z_1 = \frac{t_i V_1}{2 \cos[\text{sen}^{-1}(\frac{V_1}{V_2})]} \quad (\text{Ecuación 13})$$

El caso de estratificado horizontal de dos capas puede extenderse a múltiples capas. La geometría para múltiples capas resulta más compleja, pero sus principios están basados en los principios anteriormente analizados²⁵.

$$Z_1 = \frac{t_i V_1}{2 \cos[\text{sen}^{-1}(\frac{V_1}{V_2})]}$$

$$Z_2 = \frac{V_2}{A} (t_{i3} - t_{i2}) \cos[\text{sen}^{-1}(\frac{V_1}{V_3})] / \text{sen}^{-1}(\frac{V_1}{V_2}) \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$Z_3 = \frac{V_3}{B} (t_{i4} - t_{i3}) \cos[\text{sen}^{-1}(\frac{V_1}{V_4})] / \cos[\text{sen}^{-1}(\frac{V_1}{V_2})] - C \quad (\text{Ecuación 15})$$

En las ecuaciones 14 y 15 A, B y C están dados por:

$$A = 2 \cos[\text{sen}^{-1}(\frac{V_2}{V_3})] \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$B = 2 \cos[\text{sen}^{-1}(\frac{V_3}{V_4})] \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$C = 2z_2 / \cos[\cos(\text{sen} - (\frac{V_3}{V_4}))] \quad (\text{Ecuación 18})$$

- **capas inclinadas:** en el caso general donde la capa no es horizontal, partiendo de esto lo anteriormente analizado no es aplicable a este tipo de contactos, debido a que en capas paralelas se basan en velocidades reales de las ondas. En el caso de capas no paralelos la velocidad evaluada no es la real, sino que corresponde a la velocidad aparente²⁶.

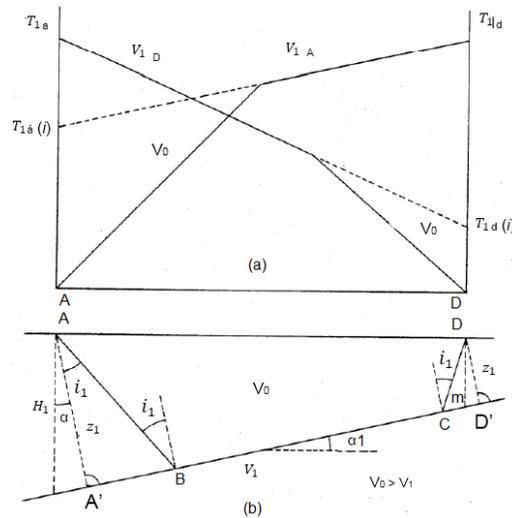
²⁵ SARRIA, Alberto. Métodos geofísicos con aplicaciones en la ingeniería civil. Bogotá: Uniandes, 1948, Pag.170-171.

²⁶ SARRIA, Alberto. Métodos geofísicos con aplicaciones en la ingeniería civil. Bogotá D.C.: Uniandes, 1948, Pag.172.

Aplicando el principio de las velocidades aparentes, este método permite establecer valores de velocidades y profundidades en estratos con capas inclinadas.

En la figura 12 se tiene un modelo de dos capas con contacto inclinado α_1 , la primera con velocidad V_0 que yace sobre una capa semi-infinita de velocidad V_1 .

Figura 12. Modelo de dos capas con contactos inclinados.



Fuente: ROSALES CLIMENT, Cristina Isabel. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Trabajo de grado. Universidad del Valle. , 2001, p.126.

Determinando las profundidades de dos puntos se puede describir el contacto de refracción. Usualmente se hace el cálculo de las profundidades en dos puntos, debajo del punto fuente directo e inverso.

Para llevar a cabo el buen desarrollo de este método se toman las siguientes suposiciones: la velocidad de las capas es constante al igual que la pendiente del refractor.

El tiempo de propagación de la onda P desde A hasta D esta expresada así:

$$(t)_{AD} = \frac{AB}{V_0} + \frac{BC}{V_1} + \frac{CD}{V_0} \quad \text{(Ecuación 19)}$$

Donde AB, BC y CD se definen:

$$AB = \frac{Z_1}{\cos(i_c)} \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$CD = \frac{Z_1}{\cos(i_c)} = \frac{Z_1 \text{sen}(\alpha_1)}{\cos(i_c)} \quad (\text{Ecuación 21})$$

$$BC = A'D' - A'B - CD' \cos(\alpha_1) - AB * \text{sen}(i_1) - CD * \text{sen}(i_1) \quad (\text{Ecuación 22})$$

Como $i_1 = i_c$, por lo tanto $\text{sen}(i_1) = \frac{V_0}{V_1}$, entonces se tiene:

$$(t)_{AD} = \frac{AB}{V_0} + \frac{AD \cos(\alpha_1) - AB \text{sen}(i_1)}{V_0} \text{sen}(i_1) + \frac{CD}{V_0} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Que resulta:

$$(t)_{AD} = \frac{AD}{V_0} \text{sen}(i_1 - \alpha_1) + 2 \frac{Z_1 \cos(i_1)}{V_1} \quad (\text{Ecuación 24})$$

La anterior ecuación describe el tiempo total de recorrido entre A y D. al analizarla para distancias variables que aumentan desde A hasta D se obtiene:

$$Tax = \frac{x}{V_0} \text{sen}(i_1 - \alpha_1) + 2 \frac{Z_1 \cos(i_1)}{V_1} \quad (\text{Ecuación 25})$$

En el caso de un disparo en D, el tiempo de D hacia A estaría dado por la siguiente formula:

$$Tdx = \frac{x}{V_0} \text{sen}(i_1 + \alpha_1) + 2 \frac{Z_1 \cos(i_1)}{V_1} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Las velocidades aparentes entonces, se puede determinar en la función de V_1 y del ángulo emergente en $A = i_1 - \alpha_1$ y en $D = i_1 + \alpha_1$ como se muestra a continuación.

Velocidad aparente de la capa 1 en sentido ascendente: $V_{1a} = \frac{V_1}{\text{sen}(i_1 - \alpha_1)}$

Velocidad aparente de la capa 1 en sentido descendente: $V_{1d} = \frac{V_1}{\text{sen}(i_1 + \alpha_1)}$

Conociendo estos datos por interpretación de las curvas tiempo-distancia se procede a definir el ángulo crítico i_1 y la pendiente del refractor α_1 de tal manera que:



$$i_1 = \frac{1}{2} \text{sen}^{-1} \left[\left(\frac{V_1}{V_{1d}} \right) + \text{sen}^{-1} \left(\frac{V_1}{V_{1a}} \right) \right] \quad (\text{Ecuación 27})$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{V_1}{V_{1d}} \right) - \text{sen}^{-1} \left(\frac{V_1}{V_{1a}} \right) \right] \quad (\text{Ecuación 28})$$

En base con la ley de Snell para el ángulo crítico se puede definir la velocidad del estrato 2 en términos de i_1 o de la α_1 .

$$V_2 = \frac{V_1}{\text{sen}(i_1)} \quad (\text{Ecuación 29})$$

$$V_2 = 2 \frac{V_{1a} V_{1d}}{V_{1a} + V_{1d}} * \cos(\alpha_1) \quad (\text{Ecuación 30})$$

Despejando de las ecuaciones 25 y 26 en términos de Z_1 y z_1 se tiene:

$$Z_1 = \frac{T_{1a} V_1}{2 \cos(i_1)} \quad (\text{Ecuación 31})$$

$$z_1 = \frac{T_{1d} V_1}{2 \cos(i_1)} \quad (\text{Ecuación 32})$$

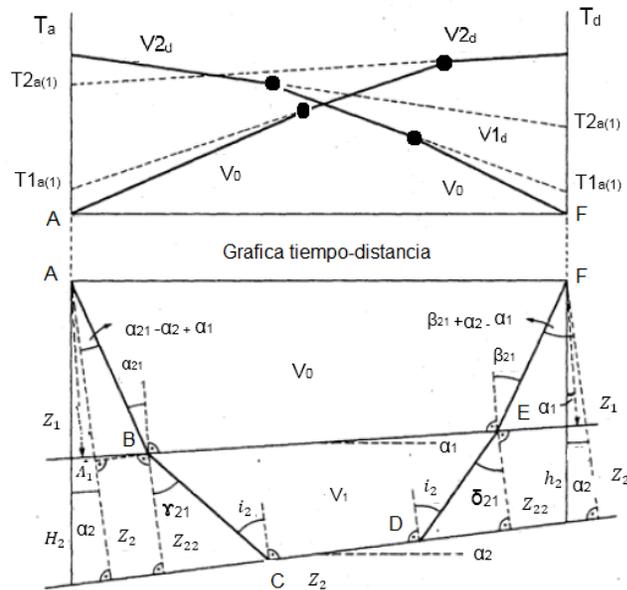
Para obtener las profundidades verticales del refracto en A y D basta con calcular las proyecciones Z_1 y z_1 , así:

$$H_1 = \frac{T_{1a} V_1}{2 \cos(i_1)} \frac{1}{\cos(\alpha)} \quad (\text{Ecuación 33})$$

$$h_1 = \frac{T_{1d} V_1}{2 \cos(i_1)} \frac{1}{\cos(\alpha)} \quad (\text{Ecuación 34})$$

En la figura 13 se tiene un modelo de dos medios con capas refractoras inclinadas.

Figura 13. Estratos inclinados de dos capas.



Fuente: ROSALES CLIMENT, Cristina Isabel. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Trabajo de grado. Universidad del Valle. , 2001, p.129.

Para el cálculo de capas inclinados se debe haber calculo el ángulo de inclinación de la primera capa y las velocidades de la primera y segunda capa. A continuación se definen los tiempos de propagación en el sentido ascendente y descendente del refractor 2 (T_{2a}) y (T_{2d}) respectivamente en función de la distancia x .

$$T_{2a} = \frac{x}{V_0} \text{sen}(\beta_{21} - \alpha_2) + \frac{Z_1}{V_0} \frac{\cos(\alpha_{21} - \beta_{21}) + 1}{\cos(\alpha_{21})} + \frac{Z_{22}}{V_1} 2\cos(i_2) \quad (\text{Ecuación 35})$$

$$T_{2d} = \frac{x}{V_0} \text{sen}(\beta_{21} - \alpha_2) + \frac{Z_1}{V_0} \frac{\cos(\alpha_{21} - \beta_{21}) + 1}{\cos(\alpha_{21})} + \frac{Z_{22}}{V_1} \quad (\text{Ecuación 36})$$

Derivando las anteriores ecuaciones con respecto a x y aplicando la ley de Snell se tiene:

$$i_2 = \frac{\gamma_{21} + \delta_{21}}{2} \quad (\text{Ecuación 37})$$

$$\alpha_2 = \frac{\gamma_{21} + \delta_{21}}{2} \quad (\text{Ecuación 38})$$

$$V_2 = \frac{V_1}{\text{sen}(i_2)} \quad (\text{Ecuación 39})$$

Al igual que en el caso de una sola capa al hacer $x = 0$, T_{2a} , T_{2d} serían los tiempos de intercepción en el origen. De tal manera que se puede despejar Z_{22} y z_{22} y luego reemplazarlas, igualando a H_2 y h_2 , se obtienen las profundidades al refractor.

$$H_2 = \frac{1}{\cos(\alpha_2)} \left[Z_1 \frac{\cos(\alpha_{21} - \alpha_3 + \alpha_2)}{\cos(\alpha_{21})} + Z_{22} \right] \quad (\text{Ecuación 40})$$

$$h_2 = \frac{1}{\cos(\alpha_2)} \left[Z_1 \frac{\cos(\beta_{21} - \alpha_3 + \alpha_2)}{\cos(\beta_{21})} + Z_{22} \right] \quad (\text{Ecuación 41})$$

3.4 MÉTODO DE REFLEXIÓN SÍSMICA

La exploración sísmica por reflexión igual que la exploración por refracción basa sus inicios en la búsqueda de hidrocarburos, actualmente la reflexión sísmica es un método geofísico de gran importancia utilizado para obtener perfiles del subsuelo de alta resolución.

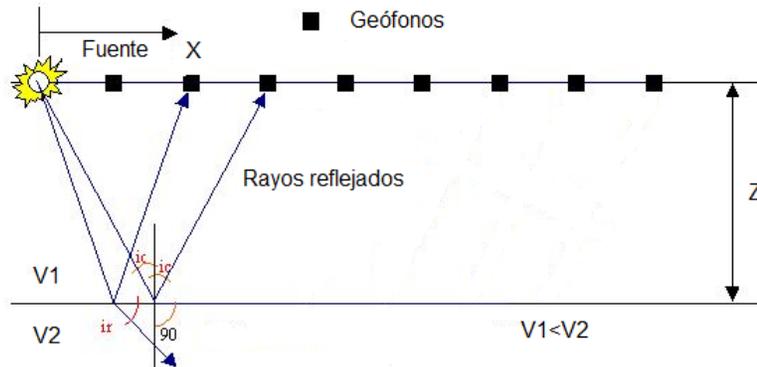
La reflexión sísmica pretende que, al generarse la perturbación, las ondas sísmicas se propagan al interior del subsuelo y se reflejen en los contactos donde se presenta un cambio de medio y posteriormente sean captadas por los geófonos, los cuales están localizados en línea recta sobre la superficie del terreno a distancias conocidas. Con este método se puede conocer el tiempo de propagación de las ondas a los diferentes contactos reflectores estableciendo así relaciones físicas y geométricas que permiten ubicar la posición de los reflectores y analizar las características de estos y del medio recorrido.

Los levantamientos sísmicos de reflexión utilizan normalmente las ondas P, que se propagan a través de las capas geológicas donde parte de la energía se refleja desde los contactos reflectores y el resto de la energía es transmitida, en este caso se hará énfasis en la energía que se refleja. Estas reflexiones se fundamentan en la ley de Snell estudiada en este capítulo en generalidades de los métodos sísmicos²⁷.

²⁷ NOLEN HOEKSEMA, Richard. Una introducción a las reflexiones sísmicas. Oilfield Review. vol. 26, no1, pág. 60.

En la figura 14 se ilustra un modelo de dos capas, la primera con velocidad V_1 y la segunda con velocidad V_2 , en donde $V_1 < V_2$. En la parte superior se observa la ubicación de la fuente y alineados horizontalmente respecto a esta se encuentran los geófonos. Al generarse la perturbación los rayos se propagan a través del primer medio encontrándose con el cambio de medio donde son reflejados hacia la superficie y posteriormente ser captados por los geófonos.

Figura 14. Reflexiones sísmicas.



Fuente: <http://www.demecanica.com/Geotecnia/geotecnia.htm> y editada.

3.4.1 ADQUISICION DE DATOS EN CAMPO

En este método la obtención de datos en campo es similar al ya expuesto anteriormente en refracción sísmica, ya que la onda es generada artificialmente y transmitida en el medio. El equipo utilizado para llevar a cabo las mediciones de reflexión sísmica es el mismo empleado en refracción sísmica.

La reflexión puede ser implementada en tierra o en mar, para la adquisición terrestre los datos se recolectan a través de un tendido de geófonos en el terreno ubicados en línea recta; para la adquisición marina la fuente y los cables sísmicos que son arreglos de geófonos unidos a un cable que se extiende desde la popa de una embarcación que se desplaza lentamente y las fuentes sísmicas se ubican normalmente frente a los cables sísmicos²⁸.

²⁸ NOLEN HOEKSEMA, Richard. Una introducción a las reflexiones sísmicas. Oilfield Review. vol. 26, no1, pág.61.

3.4.2 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Los datos obtenidos anteriormente se tratarán y analizarán en este espacio.

Tanto en tierra como en mar, cada geófono registra una traza que representa la señal de amplitud de la onda sísmica. El tendido sísmico está compuesto de geófonos que se activan inmediatamente se genere el impacto, por este motivo se registran múltiples trazas, en la figura 9 se observa un registro típico de un sismograma en la cual se aprecian las reflexiones que tienden a formar hipérbolas.

El tiempo de registro, es el tiempo que transcurre desde que se genera la perturbación, esta señal se propaga y es reflejada en el límite del cambio de medio, hasta que llega nuevamente a la superficie y es registrada por los geófonos, es decir, el tiempo de ida y vuelta de la onda (tiempo doble). La ecuación que describe el tiempo de ida y vuelta es la siguiente:

$$\frac{V_1^2 t^2}{4Z^2} - \frac{x^2}{4Z^2} = 1 \quad (\text{Ecuación 42})$$

Donde:

V_1 = velocidad de transmisión de las ondas en el medio superior.

x =distancia desde la fuente al receptor.

Z =profundidad de la interfaz.

La ecuación 42 describe la ecuación de una hipérbola si se expresa así:

$$t^2 = \frac{x^2}{V_1^2} + \frac{4Z^2}{V_1^2} = \frac{x^2}{V_1^2} + t_0^2 \quad (\text{Ecuación 43})$$

se puede obtener una recta con pendiente $1/V_1^2$ al obtener una intersección con el eje de las ordenadas²⁹.

3.4.3 MODELADO

Un registro sísmico es la colección de trazas registradas desde un solo punto de emisión, un registro es un grupo de datos que tienen en común un mismo punto de reflexión, se expresa gráficamente donde la localización de los receptores corresponde al eje horizontal y el tiempo de registro al eje vertical³⁰.

²⁹ COMISION NACIONAL DEL AGUA. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. México 2007, pág. 64.

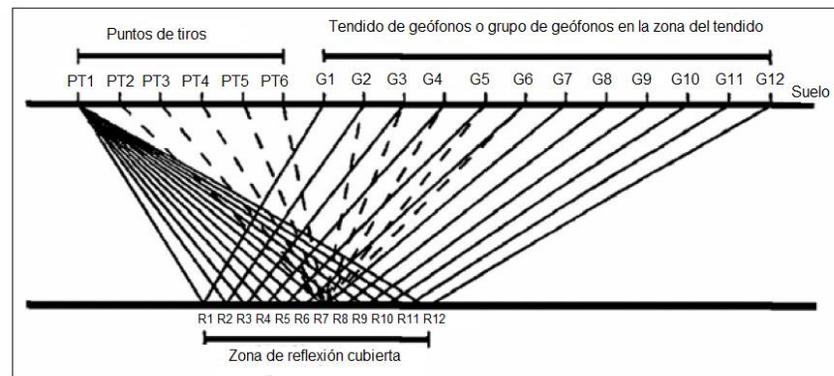
³⁰ NOLEN HOEKSEMA, Richard. Una introducción a las reflexiones sísmicas. Oilfield Review. vol. 26, no1, pág.61.

Para el análisis de los datos obtenidos se emplea el método del punto medio común (CMP).

3.4.3.1 Método del punto medio común (CMP)

Esta técnica busca la agrupación de trazas que tengan un mismo punto de emisión (ver figura 15), en la cual se aprecian tres zonas, el tendido sísmico con sus respectivos geófonos sobre la superficie del terreno y la ubicación de las fuentes, una tercera zona es la de reflexión. Se aprecia las trazas que comparten un mismo punto de emisión, donde estas se pueden relacionar a través de procesamientos adecuados y posteriormente generar un apilamiento.

Figura 15. Diagrama de reflejo de punto medio común.



Fuente: COMISION NACIONAL DEL AGUA. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. México. 2007, pág. 70.

En la figura 16(a) se tiene un punto en la superficie situado en la mitad del tendido, entre las fuentes y los geófonos, al cual se le denomina punto medio común (CMP), de esta se obtienen las trazas que comparten un mismo punto común. Al número de trazas que componen el CMP se le denominará *fold* (cobertura)³¹, seguidamente se organizan las trazas por grupos de CMP y se calcula el número de *fold*.

En parte (b), se grafican los grupos de CMP donde más coincidieron trazas (*fold*), en el eje vertical se sitúa el tiempo de viaje doble y en el eje horizontal el desplazamiento, debido a que la distancia en la fuente y los geófonos aumenta por la separación de estos, el tiempo de propagación y recepción de cada onda es

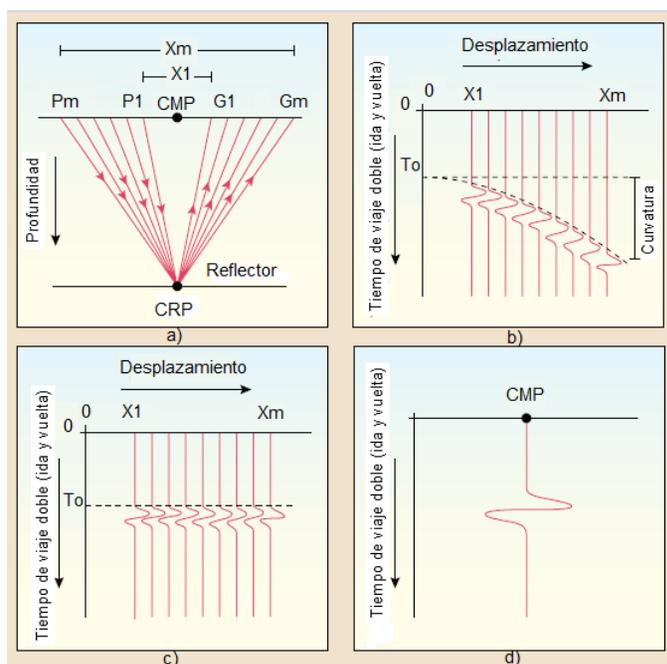
³¹ DE LA PEÑA; Rafael Bartolome. Evolución tectónica del margen continental Oeste de México: Fosa mesoamericana y Golfo de California. Barcelona, España. Tesis de Doctorado. Institut de Ciències de la Terra Aume Almera. 2002, pág.29.

prolongado para cada receptor, por tal motivo al aumentar el desplazamiento aumenta el tiempo de propagación generando así la curvatura observada.

Posteriormente se realiza la corrección de la curvatura, eliminando la variación en el tiempo y agrupando así las trazas de CMP en un tiempo t_0 (ver figura 16(c)) la corrección de esta curvatura se denomina corrección de sobretiempos normal o corrección dinámica debido a la oblicuidad de las trazas (NMO).

En la parte (d) el apilamiento de CMP es la superposición de las trazas corregidas también conocido como apilamiento de CMP, con este proceso se elimina el ruido captado durante la adquisición en campo.

Figura 16. Apilamiento de trazas en un punto medio común CMP.



Fuente: NOLEN HOEKSEMA, Richard. Una introducción a las reflexiones sísmicas. Oilfield Review. Vol. 26, no1, pág.61.

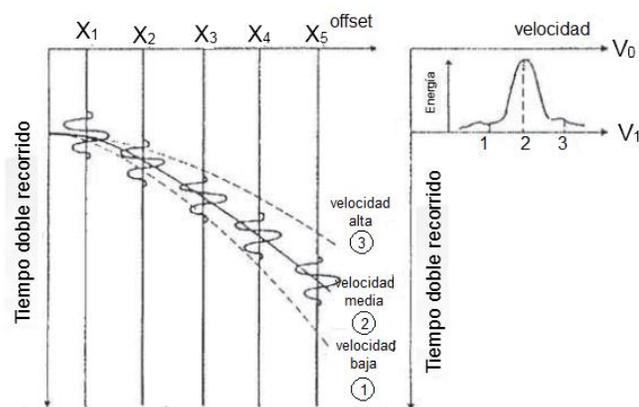
- **Análisis de velocidad mediante semblanza.**

Las reflexiones están representadas por funciones hiperbólicas que describen el tiempo de recorrido desde la fuente hasta el receptor. Cada hipérbola corresponde a una reflexión y tendrá como característica un tiempo t y una velocidad RMS

El propósito del análisis de velocidad es obtener los picos que corresponden a la mejor coherencia de la señal a lo largo de la trayectoria hiperbólica.

El análisis de semblanza o coherencia consiste en realizar un estudio de la coherencia lateral de la señal para diferentes trayectorias hiperbólicas. En la figura 17 se representa los valores de la energía resultante para las diferentes estimaciones donde los máximos corresponden a las reflexiones de cada CMP³².

Figura 17. Representación de análisis de velocidades mediante la técnica de semblanza.



Fuente: DE LA PEÑA; Rafael Bartolome. Evolución tectónica del margen continental Oeste de México: Fosa mesoamericana y Golfo de California. Barcelona, España. Tesis de Doctorado. Institut de Ciències de la Terra Aume Almera. 2002, pág.36.

La semblanza es la relación normalizada de la energía (NE) entre la energía que sale tras el stack y la energía antes de él, representada matemáticamente a continuación:

$$NE = \frac{1}{M} \frac{\sum_t S_t^2}{\sum_t \sum_{i=1}^M f_{i,t}^2(t)} \quad (\text{Ecuación 44})$$

Donde

M= número de trazas del CMP o fold.

³² DE LA PEÑA; Rafael Bartolome. Evolución tectónica del margen continental Oeste de México: Fosa mesoamericana y Golfo de California. Barcelona, España. Tesis de Doctorado. Institut de Ciències de la Terra Aume Almera. 2002, pág.35.

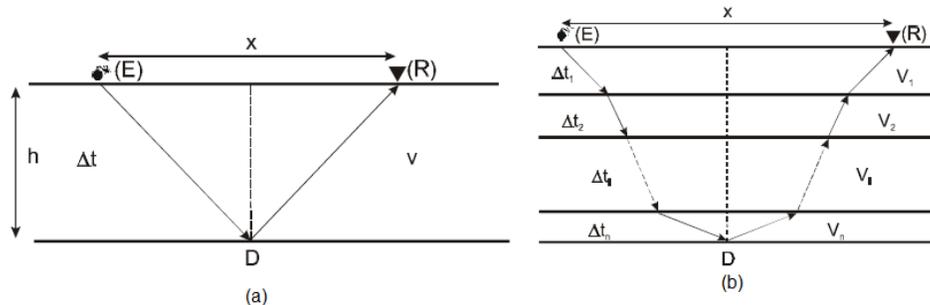
$S_t = \sum_{i=1}^M f_{i,t(i)}^2$, el valor de la amplitud del stack con $f_{i,t(i)}$ el valor de la amplitud en la traza i , a doble tiempo de recorrido $t(i)$.

Una vez realizado el análisis de semblanza para cada reflexión es necesario llevar a cabo la corrección de NMO (corrección de sobre tiempo normal) para lo cual es indispensable conocer las velocidades RMS anteriormente descritas.

- **Corrección de sobre tiempo normal (NMO).**

Existen diferencias de tiempo entre las trazas sísmicas que forman un punto medio común (CMP) debido a las distancias existentes entre la fuente y los geófonos, esta corrección permite que todas las trazas sean equivalentes y así poder superponerlas. A este proceso se le denomina corrección de sobre tiempo normal (NMO), esta corrección es más grafica ya que al realizar la corrección se observa el movimiento perpendicular a la superficie de los geófonos³³.

Figura 18. Trayectoria de rayos reflejados para una y múltiples capas.



Fuente: DE LA PEÑA; Rafael Bartolome. Evolución tectónica del margen continental Oeste de México: Fosa mesoamericana y Golfo de California. Barcelona, España. Tesis de Doctorado. Institut de Ciències de la Terra Aume Almera. 2002, pág.31.

En la figura 18(a) se presenta el esquema de la trayectoria del rayo para una capa horizontal, retomando la ecuación 15 en la cual se expresa el tiempo de propagación desde la fuente hasta el geófono

$$t^2(x) = \frac{x^2}{v_1^2} + t_0^2 \tag{Ecuación 45}$$

³³ DE LA PEÑA; Rafael Bartolome. Evolución tectónica del margen continental Oeste de México: Fosa mesoamericana y Golfo de California. Barcelona, España. 2002, pág.30. Tesis de Doctorado. Institut de Ciències de la Terra Aume Almera.

En donde:

$$t_0 = \frac{2h}{v} \quad (\text{Ecuación 46})$$

La corrección dinámica (Δt_{NMO}) esta dada por la diferencia entre $t(x)$ y $t(0)$:

$$\Delta t_{NMO} = t(x) - t(0) = \sqrt{t^2(0) + \frac{x^2}{v^2}} - t(0) = \sqrt{\frac{4h}{v^2} + \frac{x^2}{v^2}} - \frac{2h}{v} \quad (\text{Ecuación 47})$$

Se puede observar que la corrección depende de la velocidad (V) del medio, aparte de la profundidad del reflector (h) y del offset (x).

Para un medio formado por múltiples capas horizontales (n) cada una de ellas con una velocidad ($V_1, V_2, V_3, \dots V_n$) y espesores determinados como se muestra en la figura 18(b) se consideran los rayos desde la fuente E hasta los geófonos R, con el offset (x) y el punto D.

La ecuación para el tiempo de recorrido fue derivada por Tener y Koehler (1969) como:

$$t^2 = C_0 + C_1 x^2 + C_2 x^4 + C_3 x^6 + \dots, \quad (\text{Ecuación 48})$$

Donde $C_0 = t^2(0)$, $C_1 = 1/V_{rms}^2$, y C_2, C_3 , son funciones complejas que dependen del espesor de las capas y de las velocidades.

La velocidad V_{rms} bajo el reflector donde el punto D está situado, se define como:

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{t(0)} \sum_{i=1}^N V_i^2 \Delta t_i(0) \quad (\text{Ecuación 49})$$

Donde Δt_i es el doble tiempo de recorrido en la vertical de la capa i con:

$$t(0) = \sum_{k=1}^N \Delta t_k$$

En reflexión sísmica las profundidades son mayores que los offsets considerados en tendido sísmico. Y por tanto la corrección dinámica vendrá dada por:

$$\Delta t_{NMO,n} = \sqrt{t_n^2(0) + \frac{x^2}{V_{rms,i}^2}} - t_n(0) \quad (\text{Ecuación 50})$$

Al comparar las ecuaciones para una y N capas vemos que son del todo análogas excepto que la velocidad requerida para la corrección NMO, en múltiples capas es

la velocidad cuadrática media (V_{rms}^2), gráficamente se observa en ambos casos hipérbolas para la representación de CMP con el tiempo.

3.4.4 MIGRACIÓN O REPOSICIONAMIENTO

La migración es una técnica avanzada de procesamiento sísmico que se puede realizar antes o después del apilamiento, que reposiciona los reflectores inclinados que aparezcan desplazados de su posición inicial. Dando como resultado mayor definición mostrando planos de falla o capas cóncavas y convexas. Esta técnica se puede aplicar a cualquier estructura sin importar su complejidad, además es utilizada para la eliminación de interrupciones en la continuidad de un reflector debido a difracciones.

Las principales razones por las que se migra una sección sísmica son:

- La migración muestra los reflectores con pendientes en su verdadera posición.
- Puede eliminar efectos de la curvatura del reflector.
- Puede colapsar o focalizar difracciones provenientes de fallas u otras discontinuidades.
- La migración en profundidad puede eliminar distorsiones debido a variaciones laterales de la velocidad.
- Mejora la continuidad, coherencia y resolución de los reflectores.
- Recupera la estratigrafía colapsando difracciones y delineando fallas.

Generalmente la sección migrada es mostrada en tiempo doble de recorrido, una de las razones es la falta de control en las velocidades en sísmica para realizar una buena conversión de tiempo a profundidad. El proceso de migración que produce una sección en doble tiempo de recorrido es conocido como migración en tiempo (*time migration*)³⁴.

3.5 MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)

El método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) fue presentado por primera vez en el año 1999. MASW es un método de estudio sísmico que evalúa las condiciones elásticas (rigidez del subsuelo) con fines geotécnicos, este método estudia la propagación de las ondas sísmicas superficiales, principalmente las

³⁴ DE LA PEÑA; Rafael Bartolome. Evolución tectónica del margen continental Oeste de México: Fosa mesoamericana y Golfo de California. Barcelona, España. Tesis de Doctorado. Institut de Ciències de la Terra Aume Almera. 2002, pág.45.

ondas de Rayleigh (ver 3.2.1.2 ondas superficiales), las cuales son propagadas horizontalmente desde la fuente hasta los geófonos³⁵.

Según la naturaleza de la fuente sísmica MASW se puede clasificar en activo o pasivo. MASW activo es aquel en que la fuente sísmica es generada artificialmente ya sea por el golpe de un mazo, disparos o explosivos. MASW pasivo utiliza ondas superficiales que se generan a partir de actividades culturales como el tráfico de vehículos y trenes, ruido industrial y demás, también por actividades naturales que pueden ser terremotos, truenos, movimientos de mareas o cambios de presión atmosférica.

Una característica principal que diferencia MASW activo del pasivo es que en el activo se conoce la ubicación de la fuente, caso que no ocurre en MASW pasivo.

El desarrollo de este método consta de cuatro partes fundamentales que son³⁶:

- Adquisición de registro multicanal.
- Estimación de las curvas de dispersión de modo fundamental (una curva a partir de cada registro).
- Inversión de estas curvas para obtener 1-D (profundidad) V_S (un perfil de una curva).
- Múltiples montajes 1-D, resultados en imágenes 2-D.

A continuación, se desglosará cada uno de los ítems anteriormente mencionados.

3.5.1 ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO

Para esta investigación se emplea la adquisición de datos generando las ondas a partir de una fuente activa por el golpe de un mazo. En la tabla 3 se describen parámetros a tener en cuenta para la adquisición de datos

³⁵ MASW.com, Multichannel Analysis of Surface Waves, <http://masw.com/WhatisMASW.html> [Consulta: Domingo, 27 de marzo de 2016].

³⁶ SurfSeis MASW Software, Introduction to MASW Acquisition and Processing, 2014, <http://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/masw.html> [Consulta: Lunes, 11 de abril de 2016].

Tabla 3. Parámetros de adquisición de análisis típico de MASW³⁷.

Parámetros de adquisición de Análisis típico de multicanal de Ondas Superficiales (MASW).	
Desplazamiento mínimo (distancia entre la fuente y primero geófono)	5-20 m Es posible que quiera conseguirse un par de conjuntos de datos por mover la fuente (se elegirá el mejor conjunto de datos para el análisis de los espectros de velocidad respectiva)
Espaciamiento de geófonos	El punto es el siguiente: la longitud del geófono matriz debe ser tan largo como sea posible. Si el espacio disponible es, por ejemplo, 75 metros y tienen 24 geófonos, a continuación, se puede fijar la distancia geófono como 3 m (con una mínima distancia de desplazamiento de 5 m) Dos hechos importantes a tener en cuenta: 1. La profundidad de penetración máxima puede ser más o menos considerado no mayor que la mitad del matriz geófono. 2. El número de geófonos no es tan relevante.
Tipo de geófonos	Componente vertical de las ondas de Rayleigh: geófonos verticales. Componente radial de las ondas de Rayleigh: geófonos horizontales se fijan radialmente a la matriz. Las ondas de Love: geófonos horizontales establecidas perpendicularmente. Frecuencia propia: 4,5 Hz (o menos)
Tiempo de grabación	2 s son por lo general más que suficiente (es esencial que la tendencia de onda en toda la superficie está completamente grabada incluso en el último canal / trace)

³⁷ DAL MORO, Giancarlo. Surface Wave Analysis for Near Surface Applications. Italia: Elsevier, 2015, p.4.

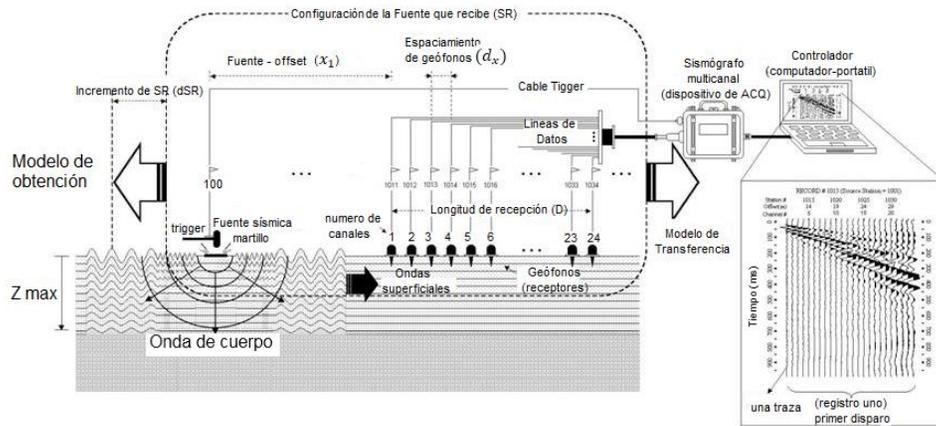
Continuación de la tabla 3.

Número de canales / geófonos	12-24 Menos número de canales a veces son suficientes. El punto crucial es de todos modos la longitud total de la matriz, posiblemente no menos de 50 m decir, mucho mejor 70-90 m (Para alcanzar la longitud sugerido, simplemente actuar modificando la distancia del geófono)
dt (intervalo de muestreo)	Para aplicaciones geológicas cercanas a la superficie, 1 ms es definitivamente más que suficiente (Frecuencia Nyquist $\frac{1}{4}$ 500 Hz)
Notas	Sin AGC (Control Automático de Ganancia) Sin filtro Mantener, si es posible, el mismo valor de amplificación / ganancia para todos los canales (esto se convierte en imprescindible cuando estamos interesados en el análisis de atenuación). Sólo tenga cuidado: No saturar los canales cercanos a la fuente y mantener una buena relación señal-ruido para el lejano offsets (donde la amplitud de la señal es necesariamente inferior)

Fuente: DAL MORO, Giancarlo. Surface Wave Analysis for Near Surface Applications. Italia: Elsevier, 2015, p.31. Y editada.

En la figura 19 se ilustra un tendido sísmico el cual está compuesto por dos zonas: la primera zona fuente generadora de ondas, la segunda por geófonos receptores de señales (24 canales); estos se conectan al sismógrafo multicanal el cual registra las señales captadas. El mazo generador de la perturbación está conectado al sismógrafo por medio de un cable llamado Tigger. El sismógrafo a su vez se enlaza con una computadora que nos permite visualizar en una gráfica las señales captadas.

Figura 19. Arreglo sísmico para MASW.



Fuente: MASW.com, Multichannel Analysis of Surface Waves, <http://masw.com/WhatisMASW.html> [Consulta: Domingo, 27 de marzo de 2016].

3.5.2 ESTIMACIÓN DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN

Al generar un perfil de velocidad de onda de cizalla es esencial elaborar la curva de dispersión la cuales se muestran generalmente como la velocidad de fase vs frecuencia (ver figura 20). Esta relación se establece calculando la velocidad de fase a partir de la pendiente lineal de cada componente del registro de la frecuencia de barrido. Para que estas curvas sean más precisas se puede hacer un análisis y eliminación del ruido sobre los datos Ground roll.

Para la obtención de dicha curva se realiza la transformada rápida de Fourier en el tiempo, donde se trasforma la señal del dominio de tiempo a dominio de frecuencia como se expresa en la siguiente ecuación:

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (\text{Ecuación 51})$$

Obteniendo una función que depende de la posición y la frecuencia la cual muestra la componente de fase de cada señal. Con estos datos se calcula la curva de dispersión utilizando la transformada directa de Fourier³⁸:

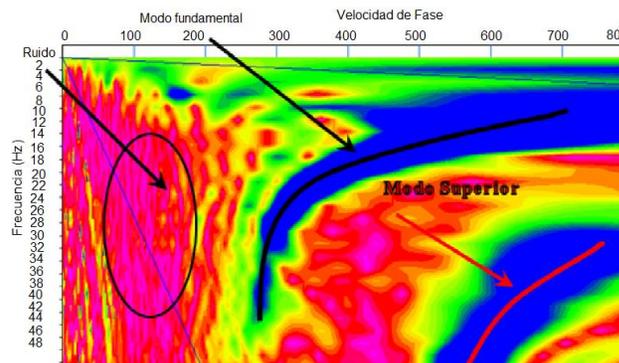
$$F(c, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x, \omega)e^{i\omega \frac{x}{c}} dx \quad (\text{Ecuación 52})$$

³⁸ GERRERO SANCHEZ, Ramsis Cecilia. Estudio de la dispersión de las ondas superficiales con fines geotécnicos. Colombia. Trabajo de grado. Universidad de los Andes. Pág. 48-49.

Determinando así la velocidad de fase para cada Δx , donde la velocidad de fase es:

$$c(\omega) = \frac{\omega \Delta x}{\Delta \phi_f(\omega)} \quad (\text{Ecuación 53})$$

Figura 20. Curva de dispersión.



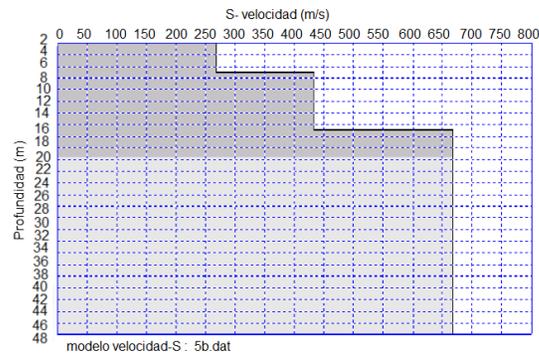
Fuente: GERRERO SANCHEZ, Ramsis Cecilia. Estudio de la dispersión de las ondas superficiales con fines geotécnicos. Colombia. Trabajo de grado. Universidad de los Andes. Pág. 49.

3.5.3 INVERSIÓN DE LA CURVA DE DISPERSIÓN

Usando procesos interactivos de inversión los cuales requieren los datos de dispersión, módulo Poisson y las densidades. Elaborando una aproximación por mínimos cuadrados se puede realizar la automatización del proceso obteniendo así los perfiles de velocidad de onda S (V_S), (ver figura 21). Para iniciar con el proceso de inversión es necesario tener un modelo inicial.

Los datos principales para realizar la curva de dispersión son: la velocidad de las ondas de Rayleigh y la curva de dispersión, también se puede incluir el espectro de potencia o distribución de la energía³⁹.

³⁹ LINARES MOTENEGRO, Giselle Mercedes. Introducción y aplicación del método de sismica de microtemores en áreas urbanas. Santenejas, Venezuela. Trabajo de grado. Universidad Simon Bolivar. 2005. Pág. 36.

Figura 21. Modelo de velocidad de onda S.

Fuente: GERRERO SANCHEZ, Ramsis Cecilia. Estudio de la dispersión de las ondas superficiales con fines geotécnicos. Colombia. Trabajo de grado. Universidad de los Andes. Pág. 50.

3.6 MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA POR MICRO-TREMOR (ReMi)

Fue propuesto por Louie (2001), entre los métodos de exploración y caracterización geofísica, esta técnica es reciente y es aplicada actualmente en la ingeniería civil. Es un método utilizado para la obtención de información general en 1-D para grandes volúmenes de tierra, sus fundamentos teóricos son los mismos que los aplicados para el método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW).

Esta técnica se basa en dos ideas fundamentales:

- Se utiliza el equipo común de registro de refracción sísmica ubicado de forma similar a las mediciones para la onda P, de esta manera grabar efectivamente ondas superficiales en frecuencias bajas como 2 Hz.
- Una transformada en 2-D de lentitud-frecuencia ($p - f$) de un registro microtremor, puede separar ondas de Rayleigh de otras llegadas de ondas sísmica, permitiendo así reconocer las velocidades de fase aparentes.

Dependiendo de las propiedades de los materiales ReMi puede determinar las velocidades de onda S (V_S). Esta técnica no requiere de una fuente de energía de onda específica y trabaja mejor en ambiente con fuertes ruidos superficiales⁴⁰.

⁴⁰JAIMES VILLAMIZAR, Jose David. Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos. Bucaramanga, Colombia. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. 2011. Pág. 66.

3.6.1 ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO

Como se mencionó anteriormente la adquisición de datos por el método de ReMi es similar al método de Refracción (ver 3.3.1. Adquisición de datos en campo), con la diferencia que la fuente generadora de ondas es tipo natural o cultural; esta última generada por el tráfico vehicular, trenes o ruidos industriales. En la tabla 4 se establecen algunos parámetros para la adquisición de este método.

Tabla 4. Parámetros de adquisición en ReMi⁴¹.

Principales parámetros de adquisición de Remi y ISAAC (y afines) Técnicas	
Geometría	En términos generales, cuanto mayor sea el mejor.
Tipo de geófonos	Para ondas Rayleigh: geófonos verticales. Para ondas Love: sensores de 3 componentes. Frecuencia propia: 4,5 Hz o (mejor) menos.
Tiempo record	10–30 min
Número de canales / geófonos	16–24
dt (intervalo de muestreo)	2–6 ms
Notas	Como de costumbre sin aire acondicionado, sin filtro.

Fuente: DAL MORO, Giancarlo. Surface Wave Analysis for Near Surface Applications. Italia: Elsevier, 2015, p.37. Y editada.

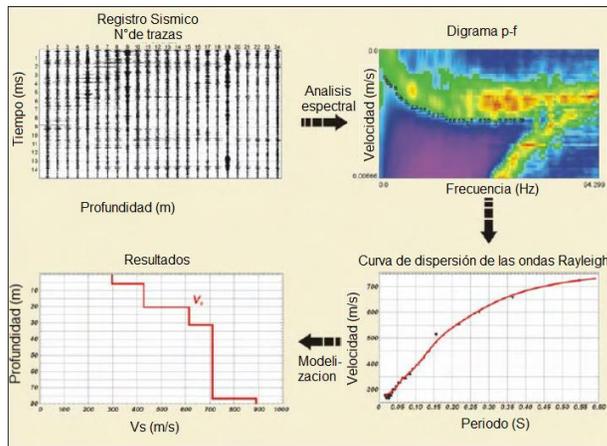
El procesamiento de datos para ReMi involucra tres pasos ver figura 22:

- Análisis espectral de velocidad.
- Selección la de dispersión fase-velocidad de Rayleigh.
- Modelado de la velocidad de onda de cizalla (V_S).

Seguidamente se tratarán cada uno de los ítems anteriores.

⁴¹ DAL MORO, Giancarlo. Surface Wave Analysis for Near Surface Applications. Italia: Elsevier, 2015, p.37. Y editada.

Figura 22. Proceso de los registros de ReMi.



Fuente: LINARES MOTENEGRO, Giselle Mercedes. Introducción y aplicación del método de sismica de microtremores en áreas urbanas. Sartenejas, Venezuela. Trabajo de grado. Universidad Simon Bolivar. 2005. Pág. 47.

3.6.2 ANÁLISIS ESPECTRAL DE VELOCIDAD

Este análisis está basado en la transformada $p - \tau$ o “Slant-Stack” descrito por Thorson y Claerbout en 1985. Esta transformación toma una sección de registro de sismogramas múltiples, con amplitudes relacionadas con la distancia y el tiempo ($t - x$), y las convierte a amplitud relacionadas con el parámetro del rayo p (el inverso de la velocidad aparente) y un intercepto en el tiempo τ . Esta transformada permite la separación, identificación y selección de la curva de dispersión de las ondas de Rayleigh (con velocidades de fases verdaderas) de entre todos los eventos registrados.⁴²

3.6.3 SELECCIÓN DE LA CURVA DE DISPERSIÓN FASE-VELOCIDAD DE RAYLEIGH

Al calcular un cociente espectral de energía se pueden normalizar la imagen $p - f$, el cociente se calcula en cada combinación lentitud- frecuencia tomando el valor de la energía en ese punto y dividiéndola entre la suma de la energía para todos los valores de lentitud de esa frecuencia. Entonces, la sección de velocidades de fase

⁴² CASALENA G. Mauro R. Caracterización geofísica del suelo somero mediante la aplicación del método de refracción por microtremores (remi) en la ciudad de Maracay- estado Aragua. Caracas, Venezuela. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. 2011. Pág. 35-37.



en las frecuencias donde se observa claramente una pendiente pronunciada en el cociente espectral permite identificar la curva de dispersión deseada.

3.6.4 MODELADO DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA S

El método ReMi realiza un modelado interactivo hacia delante de la curva de dispersión (en modo fundamental), seleccionada a partir de las imágenes $p - f$. El modelado itera en la velocidad de fase a cada periodo (o frecuencia), reporta cuando no se ha encontrado solución con los parámetros de iteración y puede modelar inversiones de velocidad con la profundidad⁴³.

3.7 PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SUELO

En la ingeniería civil el conocimiento de estos parámetros es fundamental en la rama de la geotécnica, ya que estos permiten conocer las propiedades elásticas y tener una mejor caracterización del suelo. La aplicación de los métodos geofísicos anteriormente estudiados es una herramienta interesante para la obtención de dichas propiedades.

Seguidamente se formularán los módulos elásticos expresados en términos de las velocidades de onda P y S.

3.7.1 CAPACIDAD PORTANTE (q_a)

Es la capacidad que tiene el terreno de soportar esfuerzos, es la presión de contacto promedio máxima que se genera entre el cimiento y el suelo sin que este último produzca fallas de corte, la siguiente ecuación describe la capacidad portante del suelo en términos de la velocidad de cizalla.

El uso de métodos geofísicos en la mecánica del suelo ha sido ampliamente estudiado con el fin de determinar las propiedades de los suelos y rocas por Imai y Yoshimura, Tatham, Willkens, Phillips, Keceli, Jongmans, Sully y Campanella, y Pyrak-Nolte. Imai y Yoshimura propone una expresión empírica para la determinación de la capacidad de carga última a la rotura, (q_f) y la capacidad de admisible (q_a)⁴⁴.

⁴³ JAIMES VILLAMIZAR, Jose David. Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos. Bucaramanga, Colombia. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. 2011. Pág. 73.

⁴⁴ BENTHAM OPEN.A Refined Formula for the Allowable Soil Pressure Using Shear Wave Velocities, Civil Engineering, Bogazici University, Bebek, Istanbul, Turkey, vol. 5, 2011, pág. 1.

$$nq_a = q_f = \frac{V_s^{2.4}}{1590} \quad (kPa) \quad \text{(Ecuación 54)}$$

Donde

n = Factor de seguridad.

V_s = Velocidad de onda S.

El valor del factor de seguridad n se determina según la tabla 5.

Tabla 5. Factor de seguridad n .

Tipo de suelo	(V_s)	n
Roca dura	$75 V_s \geq 4000$	1.4
Roca blanda	$750 \leq V_s \leq 4000$	$4.6 - 8.10^{-4} V_s$
Suelo	$750 \geq V_s$	4

Fuente: BENTHAM OPEN.A Refined Formula for the Allowable Soil Pressure Using Shear Wave Velocities, Civil Engineering, Bogazici University, Bebek, Istanbul, Turkey, vol. 5, 2011, pág. 3.

3.7.2 MÓDULO DE POISSON (σ)

Es la capacidad que tiene un material que se deforma longitudinalmente al aplicar una carga axial.

Suponiendo que el material es comprimido a lo largo de la dirección axial. En función de las velocidades sísmicas está dado por:

$$\sigma = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad \text{(Ecuación 55)}$$

Un material con coeficiente 0.5 es un material completamente incompresible que se deforma elásticamente a deformaciones pequeñas.

Valores en el rango $0 < \sigma < 0.05$ corresponden a rocas muy duras; y rocas alrededor de 0.45 son muy blandas⁴⁵.

⁴⁵ ROSALES CLIMENT, Cristina Isabel. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia, Trabajo de grado. Universidad del Valle. 2001, pág.34

En la tabla 6 se evidencian algunos coeficientes de Poisson.

Tabla 6. Coeficientes de Poisson.

ESTUDIO	RESULTADOS
Stokoe & Woods (1972)	$\sigma = 0,31$ para sedimentos no consolidados y no saturados.
Davis & Schulteiss (1980)	Rango entre $0,4982 < \sigma < 0,4997$ para arcillas.
Stuempel et al. (1984)	$\sigma = 0,49$ para sedimentos superficiales, arcillosos y saturados.
Meissner et al (1995)	
Tiab & Donaldson (1996)	Rango de $0,14 < \sigma < 0,41$ para diferentes litologías y grados de saturación.

Fuente: ROSALES CLIMENT, Cristina Isabel. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia, Trabajo de grado. Universidad del Valle. 2001, pág.34

3.7.3 MÓDULO DE RIGIDEZ (G)

Es la relación entre el esfuerzo transversal unitario y el desplazamiento relativo de los planos, es una medida de la deformación cortante y se expresa como⁴⁶:

$$G = \rho V_s^2 \quad (\text{Ecuación 56})$$

3.7.4 DENSIDAD DEL TERRENO (ρ)

La densidad es la relación entre la masa por unidad de volumen, este valor se puede encontrar en términos de velocidad V_p y V_s .

$$\rho = \frac{K + \frac{4}{3}G}{V_p^2} \quad (\text{Ecuación 57})$$

⁴⁶VARGAS F. Romar A. GENERACIÓN DE UN MODELO DE VELOCIDAD 3D DE ONDAS DE CORTE (V_s), INTEGRANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS SOMEROS EN UN BLOQUE DEL CAMPO JUNÍN, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO. Caracas, Venezuela. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. 2011, pág.18.

$$\rho = \frac{G}{v_s^2} \quad (\text{Ecuación 58})$$

3.7.5 MÓDULO DE YOUNG (E)

Es la relación entre el esfuerzo unitario y la deformación longitudinal unitaria expresada por:

$$E = 2G(1 + \sigma) \quad (\text{Ecuación 59})$$

3.8 MARCO GEOLÓGICO

Geológicamente el municipio de Pamplona se encuentra ubicado en el flanco norte del Macizo de Santander sobre la Cordillera Oriental y dentro del sistema de fallas Bucaramanga, Santa Marta a escala regional, esta es una zona de tectónica compresiva, enmarcada dentro de la evolución de la cordillera oriental, que generó procesos magmáticos y tectónicos que afectaron a las diferentes litologías, por tal motivo su relieve tiene origen en el levantamiento de la cordillera oriental durante el Neógeno y movimientos diferenciados del Macizo Ígneo Metamórfico de Santander, que dio como resultado plegamientos, fallas y procesos denudaciones, que dieron origen a una gran cantidad de sedimentos que fueron depositados discordantemente sobre las litologías presentes.⁴⁷

Estructuralmente el casco urbano de Pamplona se encuentra enmarcado en una zona de tectónica compresiva generada en la evolución de la cordillera Oriental, la que produce estructuras con dirección norte-sur que afecta las diferentes litologías presentes.

A escala local se presentan fallas de tipo normal con dirección este-oeste que fracturan las rocas de la formación Aguardiente y la formación Tibu-Mercedes en el cerro Cristo Rey, generando un alto fracturamiento del macizo rocoso que puede heredar planos de falla a los depósitos cuaternarios de la zona de influencia.

En la cuchilla El Escorial la formación Aguardiente presenta un sistema de fallas de contacto y normal que afecta a la parte media de la cuenca de la quebrada El Escorial, donde actualmente se vienen desarrollando proyectos urbanísticos, que ameritan ser estudiados.

La fuerte tectónica afecta los macizos rocosos de la Unidad Ortoneis produciendo fuerte fracturamiento que acelera los procesos de meteorización. Sobre los depósitos cuaternarios no se observan evidencias de Neotectónica, que suministren

⁴⁷ CORPONOR, Diagnostico Rural Pamplona Norte de Santander, <http://es.slideshare.net/kairope/capacidad-portante-de-suelos> [Consulta: viernes, 4 de marzo de 2016].



información sobre fallas en el basamento y hayan sido heredadas por los depósitos⁴⁸.

Las principales estructuras tectónicas dentro del casco urbano de Pamplona son:

- **Falla Cristo Rey:** Falla de tipo normal, con rumbo este-oeste. Afecta las rocas de la formación Aguardiente y Tibu- Mercedes, generando un paisaje de origen estructural-denudacional, la estructura afecta parte del basamento donde reposan discordantemente depósitos de ladera tipo coluvión, donde se desarrolló el urbanismo de los barrios Juan XXIII.
- **Falla El Escorial:** Sistema de fallas con rumbo este-oeste, cortadas por una falla de contacto. La falla afecta rocas de la formación Aguardiente y de la formación Tibu- Mercedes y parte de algunos afloramientos de la formación Girón que afecta los depósitos presentes en el valle de la quebrada El Escorial.

⁴⁸ Plan de Ordenamiento territorial de Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA, REFLEXIÓN SÍSMICA, MASW Y REMI EN DEPÓSITOS SUPERFICIALES Y ZONAS CRÍTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA.

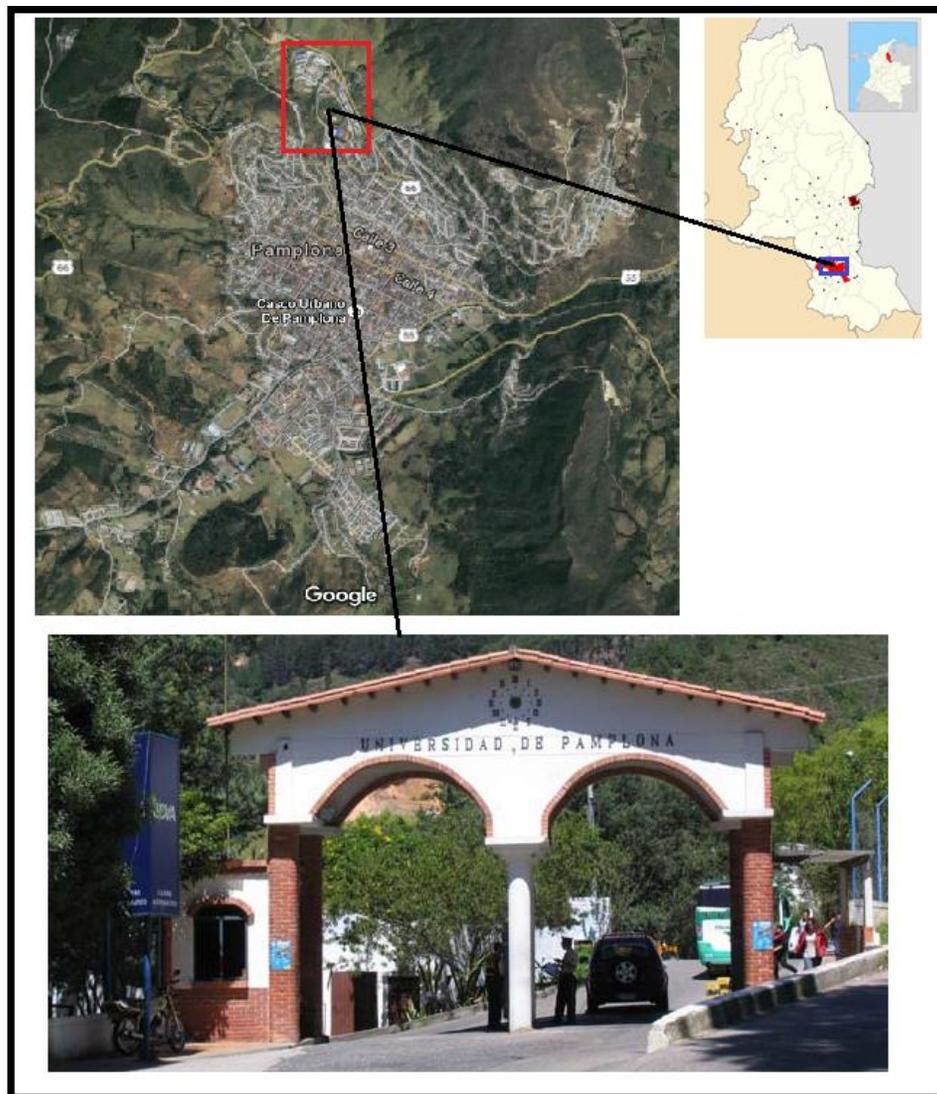
Capítulo 4. Diseño y Adquisición de Datos Sísmicos.

4 DISEÑO Y ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS

Esta sección del trabajo, se enfoca en los equipos utilizados y el diseño de las líneas sísmicas que se realizaron para la caracterización de las zonas de investigación que se encuentran en la Universidad de Pamplona.

La Universidad de Pamplona sede principal está ubicada en el kilómetro 1 vía Bucaramanga (El Buque) Pamplona, Norte de Santander, Colombia, como se muestra en la figura 23.

Figura 23. Ubicación de la Universidad de Pamplona.



Fuente: Google Maps & Universidad de Pamplona.

En la figura 24 se muestran las zonas de estudio en las cuales se aplicaron los métodos estudiados en esta investigación.

- Zona 1: Cancha de Fútbol Alberto Gonzales.
- Zona 2: Biblioteca Padre José Rafael Faría Bermúdez.
- Zona 3: Edificio Administrativo CETA General Leonardo Canal Gonzáles.
- Zona 4: Edificio Jorge Gaitán Durán.
- Zona 5: Vía Bucaramanga.

Figura 24. Zonas de caracterización.



Fuente: Google Maps y editada.

4.1 EQUIPOS UTILIZADOS

Para la aplicación de estas técnicas se requieren principalmente de equipos topográficos y equipos de exploración sísmica:

4.1.1 EQUIPOS TOPOGRÁFICOS

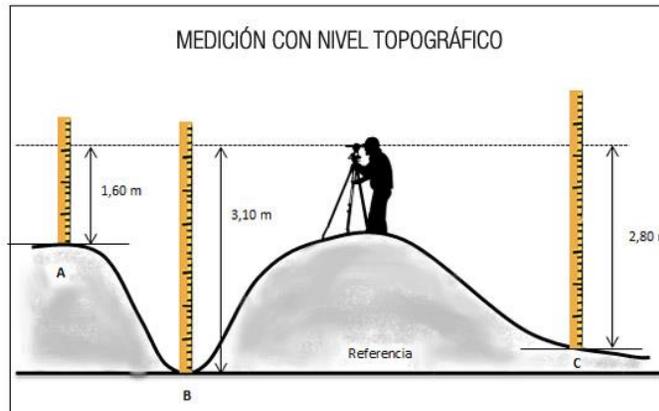
Los equipos topográficos se utilizaron para obtener un perfil superficial del terreno utilizando altimetría. Estos equipos fueron suministrados por el laboratorio de mecánica de suelo de la Universidad de Pamplona, (ver tabla 7).

Tabla 7. Equipos topográficos.

EQUIPOS	IMAGEN
<p>Sistema de posicionamiento global (GPS): El equipo GRARMIN MAP 62s, se utilizó para medir la altura con respecto al nivel del mar y así tener una cota de referencia.</p>	
<p>Nivel Topográfico: nivel con referencia HK7905 empleado para medir la altura con respecto a un punto de referencia.</p>	
<p>Trípode: se utiliza para que repose el nivel topográfico.</p>	
<p>Mira: este elemento es usado para visualizar la medida con el nivel topográfico de un punto y de esta forma saber su altura con respecto al nivel del mar (ver figura 25).</p>	

Fuente: autores.

Figura 25. Medición con nivel topográfico.



Fuente: <http://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/nivel-de-topografia>.

4.1.2 EQUIPOS DE EXPLORACIÓN SÍSMICA

En este espacio se menciona cada uno de los elementos que componen el equipo de sísmica para el montaje de las líneas (ver tabla 8).

Tabla 8. Equipos de exploración sísmica.

EQUIPOS	FIGURAS
Fuente generadora de onda sísmica.	
<p>Mazo (16 lb): con este se generan las ondas por medio de un golpe sobre una platina metálica.</p>	

Continuación tabla 8.

EQUIPOS	FIGURA
Receptores.	
<p>Geófonos azules: se utilizan para los métodos de refracción y reflexión sísmica, estos captan las ondas P y tienen una frecuencia de 14.5 Hz.</p>	
<p>Geófonos rojos: se utilizan para los métodos de MASW y ReMi, estos captan las ondas superficiales y tienen una frecuencia de 4,5 Hz.</p>	

Continuación tabla 8.

EQUIPOS	FIGURAS
Adquisición y almacenamiento.	
<p>Computador portátil: equipo que almacena los registros sísmicos para posteriormente ser procesados.</p>	
<p>Geode ultra-lite: de la empresa GEOMETRICS, con referencia SN 5701-G24, cuenta con 24 canales (geófonos), este recibe las señales captadas por lo receptores y las transmite al convertidor.</p>	

Continuación tabla 8.

<p>Cable sísmico (Goespace): cable que conecta los geófonos, tiene un espaciamiento de 10 m entre sí. Ambos extremos termina con conectores 61S su función es llevar la señal desde los geófonos hasta la unidad de adquisición.</p>	
<p>Tigger: cable con una longitud de 92 m, referencia 23219-01, que conecta la fuente al geode, este cuenta con un sensor el cual activa el sistema de grabación.</p>	
<p>Cable de interface: Referencia 28108-82 con una longitud de 25 m, se encarga de conectar el geode al pc.</p>	
<p>Convertidor: establece una comunicación entre el sismógrafo y el computador.</p>	
<p>Cable de poder: Referencia 28542-01 Cable que conecta la batería al geode encargado de transportar la energía al sistema.</p>	
<p>Batería: batería estándar de 12v la cual suministra energía al sistema por medio del cable de poder.</p>	

Fuente: autores.

4.2 DISEÑO DE LAS LINEAS SÍSMICAS

En esta sección se plantea el diseño de las líneas sísmicas, el cual se explicará a través de los métodos aplicados.

4.2.1 MÉTODO DE REFRACCIÓN Y REFLEXIÓN SÍSMICA.

El desarrollo de estos métodos se aplicó con las mismas características para todas las zonas excepto la zona 5 (Vía Bucaramanga), a continuación, se describe el diseño de las líneas.

La distribución de los geófonos se realizó para líneas de 60 m y así obtener el espaciamiento entre geófonos, donde se divide la longitud de la línea entre el número de geófonos estableciendo así distancias de 2,5m entre receptores. En la tabla 9 se especifican las características para cada zona.

Tabla 9. Características de las zonas.

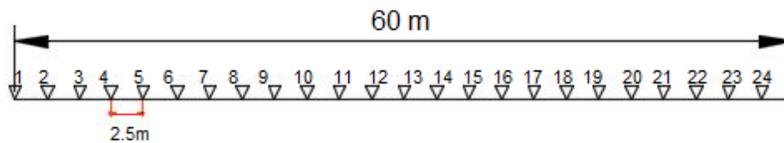
ZONAS	MÉTODO	LONGITUD	ESPACIAMIENTO ENTRE GEÓFONOS	NUMERO DE GEÓFONOS
ZONA 1	Refracción, reflexión	120m se dividió en 2 líneas de 60 m.	2,5m	24
	MASW		2,5m	24
ZONA 2	Refracción, reflexión	60m	2,5m	24
	MASW		2,5m	24
ZONA 3	Refracción, reflexión	60m	2.5m	24
	MASW		2,5m	24
ZONA 4	Refracción, reflexión	120m se dividió en 2 líneas de 60m.	2.5m	24
	MASW		2,5m	24
ZONA 5	Refracción, reflexión, MASW y ReMi	120m	5m	24

Fuente: autores.

Una vez establecido el espaciamento entre geófonos (ver figura 26), se procede a la ubicación de los mismos, para estos métodos se utilizan geófonos con frecuencia de 14,5 Hz, los cuales deben ir conectados al cable sísmico previamente extendió que a su vez es conectado al geode; a este último deben ir conectados el trigger, el cable de interface y el cable de poder que une todo el sistema a la batería.

Para estos métodos una vez establecido el espaciamento entre geófonos, se realizó la altimetría con el fin de localizar la posición de cada geófono con respecto al nivel del mar, estos datos son utilizados para el procesamiento.

Figura 26. Tendido sísmico Refracción y Reflexión.

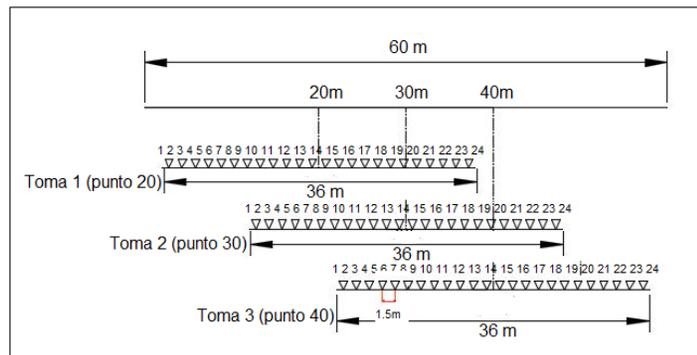


Fuente: autores.

4.2.2 MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)

Este método se aplicó en todas las zonas descritas anteriormente. En cada línea de 60m se llevaron a cabo tres tomas de MASW, la primera toma se realizó en el punto 20m, la segunda en el punto 30m y por último en el punto 40m (ver figura 27). Se utilizaron geófonos con frecuencia de 4,5 Hz, los cuales se ubicaron con espaciamento entre sí de 1,5m, excepto para la zona 5 (vía Bucaramanga) en donde la distancias fue de 1m y solo se realizaron dos tomas, la primera a 12m y la segunda en 108m, como en la figura 28.

Figura 27. Tendido sísmico (MASW).

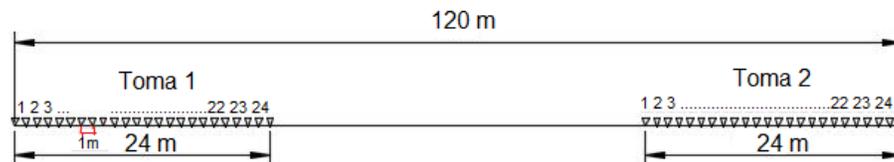


Fuente: autores.

4.2.3 METODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA POR MICRO-TREMORES (ReMi)

El desarrollo de este método se realizó únicamente en la zona 5 (vía Bucaramanga), ya que este método pasivo capta las ondas producidas por las vibraciones del tránsito vehicular sobre esta vía. Se realizó el tendido sísmico utilizando los geófonos de 4,5 Hz, con espaciamentos de 1m entre sí. De manera similar que en MASW se hicieron dos registros desplazando la línea en el punto 12m y 108m, (ver figura 28).

Figura 28. Tendido sísmico ReMi.



Fuente: autores.

Para cada una de las zonas una vez establecido el espaciamento entre geófonos, se realizó la altimetría con el fin de localizar la posición de cada geófono con respecto al nivel del mar, estos datos son utilizados para el procesamiento.

4.3 ADQUISICIÓN DE DATOS

Una vez realizado el diseño de las líneas sísmicas se procede al montaje de las líneas para cada zona como se evidencia en las siguientes figuras.

En la figura 29 se observa el tendido sísmico realizado para la zona 1, donde se aprecia el cableado y la ubicación de los geófonos.

Figura 29. Adquisición en campo zona 1.



Fuente: autores.

El tendido sísmico realizado en campo de la zona 2, se puede apreciar en la figura 30.

Figura 30. Adquisición de datos en campo zona 2.



Fuente: autores.

En la figura 31 se observa el tendido sísmico de la zona 3, con sus respectivos geófonos y demás elementos del sistema.

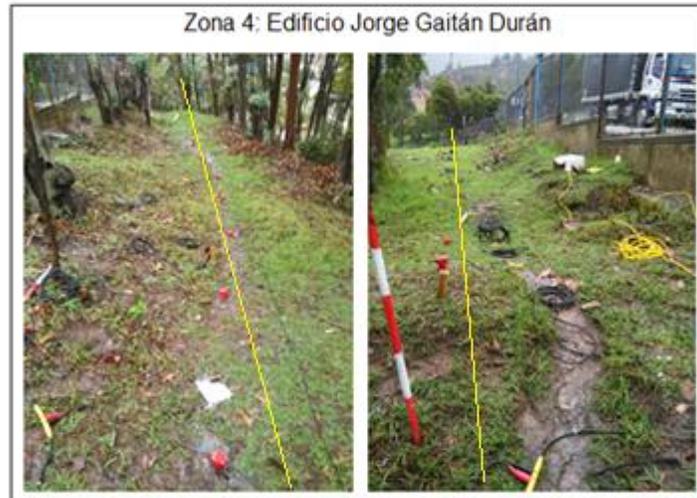
Figura 31. Adquisición de datos en campo zona 3.



Fuente: autores.

En la figura 32 se observa el tendido sísmico realizado para la zona 4, donde se aprecia el cableado y la ubicación de los geófonos.

Figura 32. Adquisición de datos en campo zona 4.



Fuente: autores.

En la figura 33 se observa el tendido sísmico que se ubicó en la zona 5, con sus respectivos geófonos y demás elementos del sistema.

Figura 33. Adquisición de datos en campo zona 5.



Fuente: autores.

A continuación, se describe como se realizó la adquisición de datos para cada uno de los métodos de estudio para esta investigación.

4.3.1 MÉTODO DE REFRACCIÓN Y REFLEXIÓN SÍSMICA

Para la adquisición de estos datos se inducen las ondas mediante el golpe de un mazo de 16 lb sobre una placa metálica, en cada punto se generan tres golpes. Este procedimiento se realiza a -2,5m del primer geófono, entre geófonos y a 2,5m del último geófono del tendido sísmico, obteniendo de esta forma 26 shot para una línea de 60m.

En la tabla 10 se muestran los parámetros de adquisición establecidos en el software Geometrics Seismodule Controller.

Tabla 10. Parámetros de adquisición para Refracción y Reflexión.

PARAMETROS	DATOS
Apilamiento	Auto apilado
Número de golpes	3 golpes
Intervalo de muestreo	0,250 ms
Tiempo de registro	1 s
Tiempo de retardo	0,1 s
Filtrado de datos	NO

Fuente: autores.

4.3.2 MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)

Para este método la fuente generadora sigue siendo el mazo de 16 lb, pero las perturbaciones se generan a -10 m del primer geófono, en el centro del tendido y a 10 m del último geófono. Este procedimiento se realiza para cada una de las tres tomas que se desarrollan en los puntos 20m, 30m, 40m, como se explicó anteriormente, los parámetros establecidos fueron los mismos que se utilizaron en Refracción y Reflexión sísmica (ver tabla 10).

4.3.3 MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA POR MICRO-TREMORES (ReMi)

Este método se caracteriza porque las ondas son generadas por el tránsito vehicular, por esta razón este método solo se desarrolló en la zona 5 (vía Bucaramanga). Para la adquisición de los datos se configuró el sistema (ver tabla



11), teniendo en cuenta que este método pasivo capta las ondas durante el paso de vehículos en un lapso de tiempo de 10 minutos, se realizó la toma dos veces para obtener mayor densidad de datos.

Tabla 11. Parámetros de adquisición para ReMi.

PARAMETROS	DATOS
Apilamiento	Auto apilado
Intervalo de muestreo	16 ms
Tiempo de registro	10 minutos
Tiempo de retardo	0.1 s
Filtrado de datos	NO

Fuente: autores.

Los datos adquiridos en cada uno de los métodos serán guardados en una carpeta llamada “datos crudos”, los cuales serán procesados posteriormente.

CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA, REFLEXIÓN SÍSMICA, MASW Y REMI EN DEPÓSITOS SUPERFICIALES Y ZONAS CRÍTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA.

Capítulo 5. Procesamiento de datos sísmicos.

5 PROCESAMIENTO DE DATOS SISMICOS

En este capítulo se muestra el procesamiento que se aplicó a los datos obtenidos para cada método.

5.1 MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA

Los datos fueron procesados con el software SeisImager de la empresa Geometrics, los módulos utilizados para este método se muestran en la tabla 12.

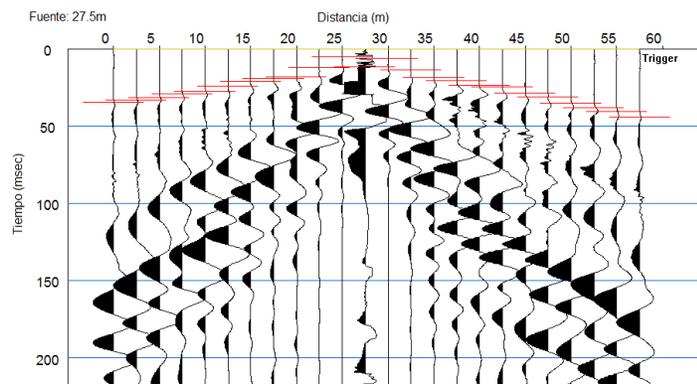
Tabla 12. Módulos de SeisImager utilizados para Refracción Sísmica.

MODULOS	FIGURA
Pickwin (Pick First Breaks or Dispersion Curves)	
Plotrefra (Refraction Analysis)	

Fuentes: autores.

Con fines prácticos a continuación se desarrollará el paso a paso para la zona 1 (Cancha de Fútbol Alberto Gonzales) y al final se mostrarán los resultados de todas las zonas en las que se aplicó este método. Con el módulo Pickwin (Pick First Breaks or Dispersion Curves) se visualizan los datos crudos y se procede a realizar el picado de los primeros arribos de la onda P para cada uno de los shots. En la figura 34 se realizó el picado para el shot 13 con fuente en 27.5m.

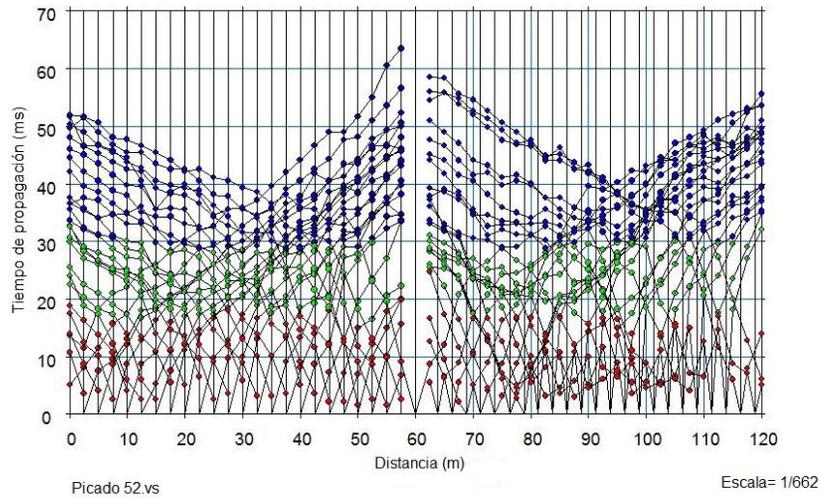
Figura 34. Picado con Pickwin.



Fuente: autores.

Con el módulo Plotrefra (Refraction Analysis) se visualiza el archivo en el que se guardaron los picados y se procede a seleccionar por capas (ver figura 35), en la figura se muestran tres capas, ya que se observaron tres cambios de pendiente, cada color identifica una capa.

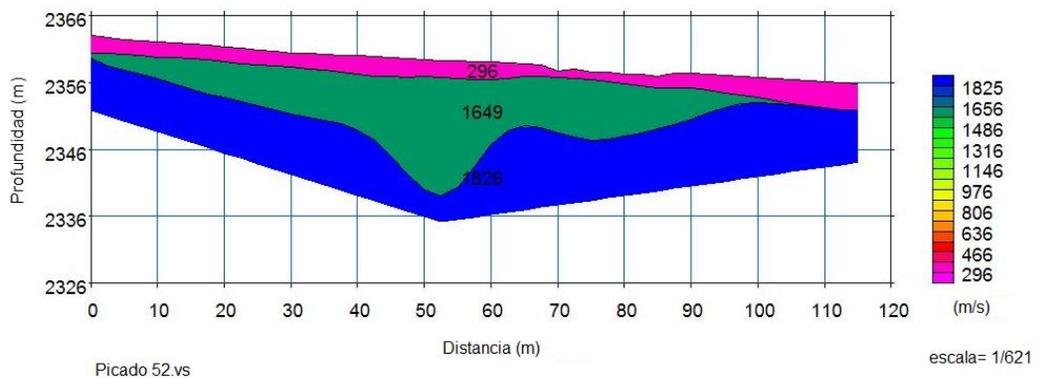
Figura 35. Determinación de capas.



Fuente: autores.

Luego de identificar las capas se obtiene un primer perfil del subsuelo como se ilustra en la figura 36, en esta se observa un modelo de tres capas con las posibles velocidades.

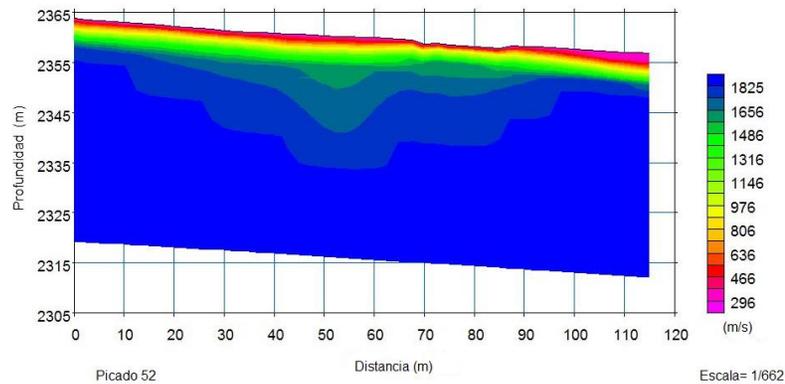
Figura 36. Modelo 1, línea completa cancha de fútbol Alberto Gonzales.



Fuente: autores.

Seguidamente se genera el modelo inicial (ver figura 37).

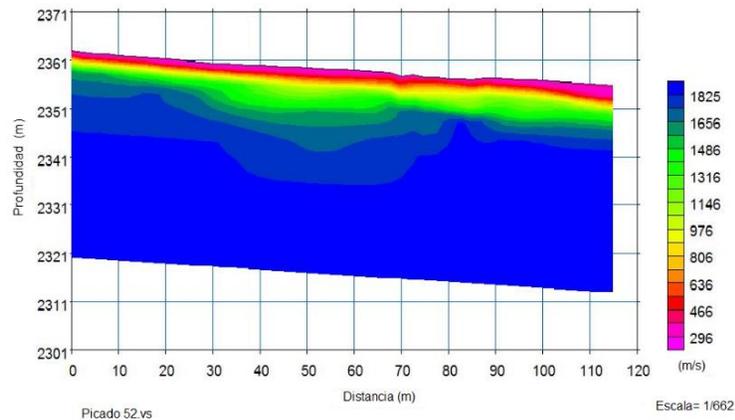
Figura 37. Modelo inicial: Modelo 2, línea completa cancha de fútbol Alberto Gonzales.



Fuente: autores.

En la figura 38 se muestra el perfil del subsuelo después de realizar la inversión del modelo inicial, la cual presenta un error de inversión $RMS=1,56ms$, en el cual se aprecian las capas existentes con sus respectivas velocidades. Este modelo es el modelo final, el cual se interpreta utilizando tablas de velocidades de onda P con el fin de conocer el tipo de suelo existente.

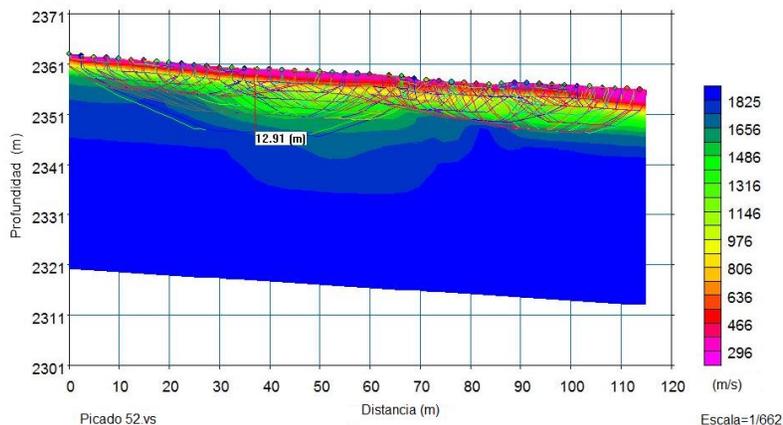
Figura 38. Inversión del modelo inicial de la línea completa cancha de fútbol Alberto Gonzales.



Fuente: autores.

Para conocer la profundidad alcanzada se realiza el trazado de rayos al modelo invertido, ver figura 39. En la cual se aprecia que la profundidad alcanzada fue de 12.91m aproximadamente.

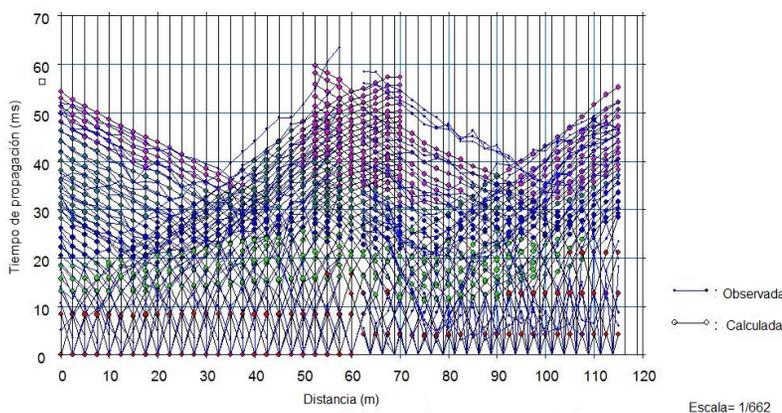
Figura 39. Trazado de rayos al modelo invertido de la línea completa de la cancha de fútbol Alberto Gonzales.



Fuente: autores.

Por último en la figura 40 se muestran las curvas de los datos observados y los datos calculados.

Figura 40. Curva de tiempos observados y calculados.



Fuente: autores.

5.2 MÉTODO DE REFLEXIÓN SÍSMICA

El procesamiento de este método se lleva a cabo utilizando el software Seismic unix (CWP). Para llevar a cabo el procesamiento de este método es indispensable contar con una buena densidad de datos, equipo con mayor número de canales y fuentes

de mayor alcance como: dinamita y vibro seis. Por tal motivo la falencia en lo anteriormente mencionado ocasiono que no fuese posible la visualización de los datos adquiridos en campo. A raíz de esto no fue posible realizar el procesamiento de los datos mediante este método.

5.3 MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)

El procesamiento en este método es el mismo para todas las zonas de aplicación, este procesamiento se realiza con el mismo software SeisImager utilizando los módulos que se muestran en la tabla 13.

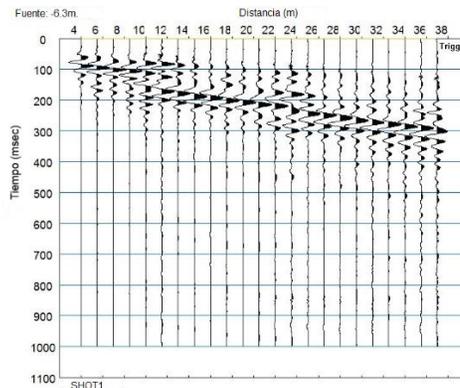
Tabla 13. Módulos de SeisImager utilizados para MASW.

MODULOS	FIGURA
Pickwin (Pick First Breacks or Dispersion Curves)	
WaveEq (Surface Wave Analysis)	

Fuente: autores.

Para explicar el procesamiento de este método se escogieron los datos de la línea de la cancha de fútbol, toma 1 la cual corresponde al punto 20m, shot 1 con posición de fuente en -6,3m del geófono 1, como se aprecia en la figura 41.

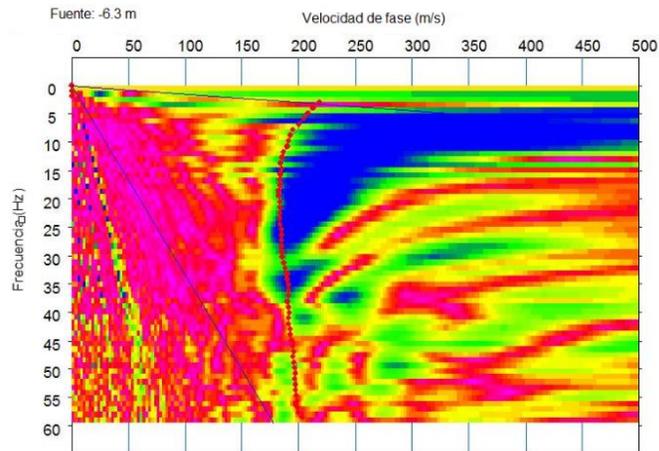
Figura 41. Dato de ondas superficiales obtenidos.



Fuente: autores.

Al tener los datos como se muestra en la figura anterior, se procede a la transformación de la velocidad de fase-frecuencia (ver figura 42), utilizando un valor máximo de velocidad (500 m/s) y frecuencia (40 Hz) de las ondas superficiales.

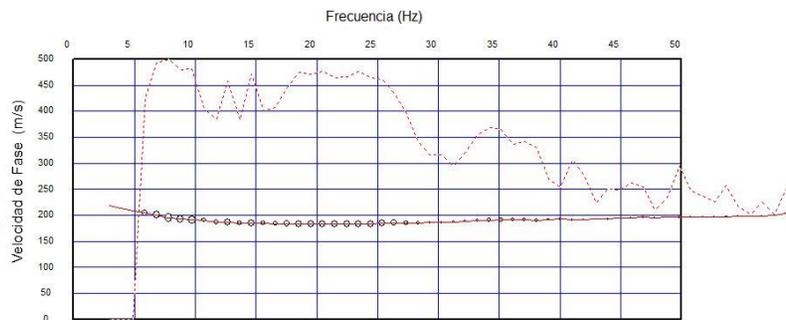
Figura 42. Velocidad de fase- frecuencia.



Fuente: autores.

Para generar la curva de dispersión es necesario realizar un picado (puntos rojos) como se puede ver en la figura 42, luego de realizar el picado se genera la curva de dispersión (ver figura 43), la cual es definitiva para la obtención de los perfiles de velocidad V_s .

Figura 43. Curva de dispersión.

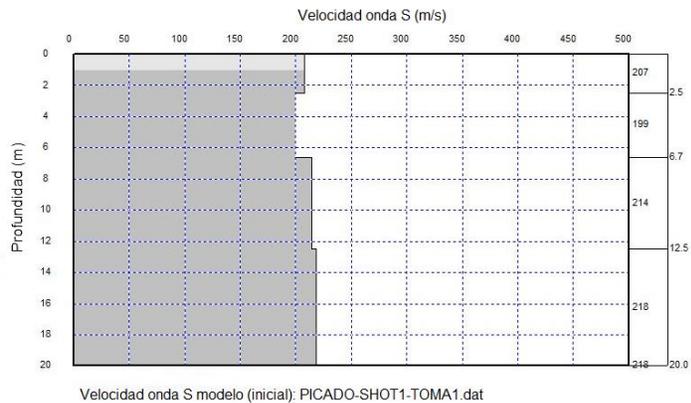


Curva de Dispersión: PICADO-SHOT1.dat

Fuente: autores.

Para la creación de un modelo de velocidad V_s primero se crea un modelo inicial (ver figura 44), introduciéndole al software la profundidad y el número de capas, para este caso se utilizó 20m y 5 capas respectivamente.

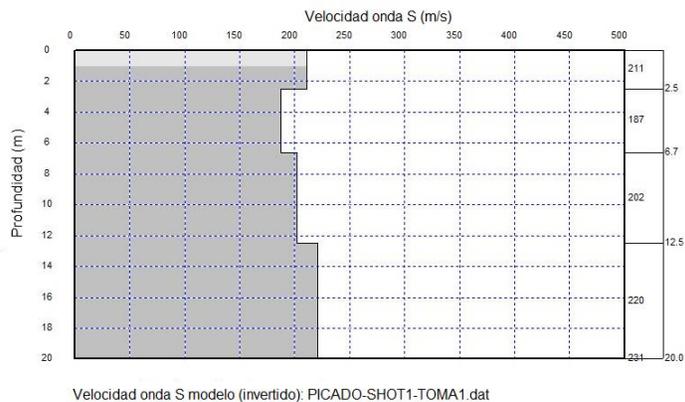
Figura 44. Modelo inicial de velocidad de onda S para MASW.



Fuente: autores.

El siguiente paso es realizar la inversión de la curva de dispersión con el fin de generar el modelo de velocidad de onda S (V_s) ver figura 45, para esto se utilizaron 10 iteraciones.

Figura 45. Modelo de velocidad de onda S (V_s).

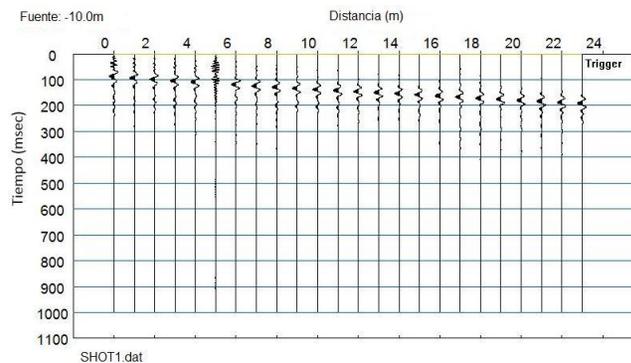


Fuente: autores.

5.4 MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA POR MICRO-TREMORES (REMI)

La aplicación de este método pasivo se realizó en la zona 5 (vía Bucaramanga), el procesamiento de estos datos se elabora de manera conjunta, tomando los datos de MASW y ReMi, es decir, en el software SeisImager utilizando los mismos modulo que en MASW (ver tabla 13), se abren los datos que se haya registrado en cada línea (ver figura 46), para el caso de la zona 5 se hicieron dos tomas en cada línea y por cada método, para un total de 4 shot entre los dos métodos.

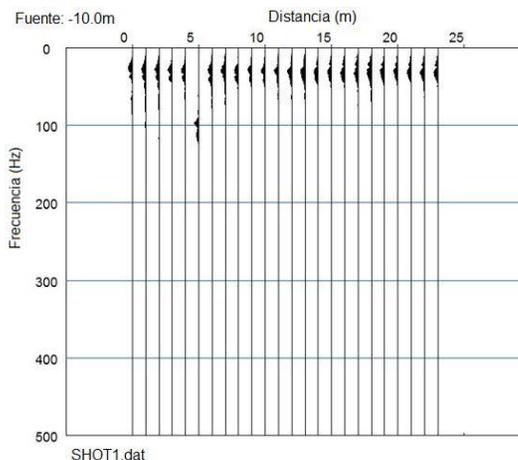
Figura 46. Datos crudos línea 1 MASW y ReMi.



Fuente: autores.

Una vez abiertos los datos se procede a la transformación en el dominio de la frecuencia, esto para llevarlos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia como se aprecia en la figura 47. Este procedimiento es necesario para poder evaluar la calidad de los datos de la fuente pasiva.

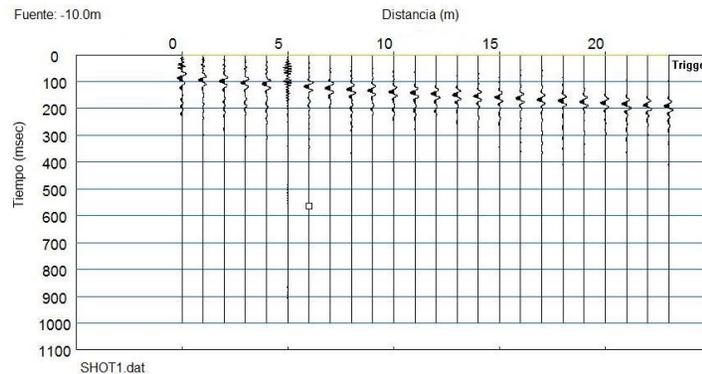
Figura 47. Dominio de la Frecuencia línea 1 MASW y ReMi.



Fuente: autores.

Luego se vuelve al dominio del tiempo usando la opción que da el software como se muestra en la figura 48.

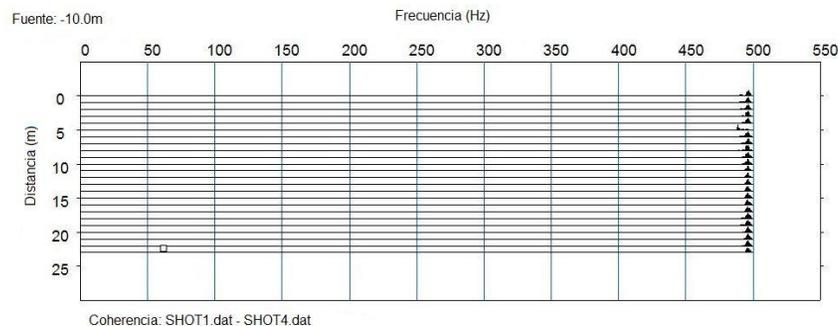
Figura 48. Dominio del tiempo línea 1 MASW y ReMi.



Fuente: autores.

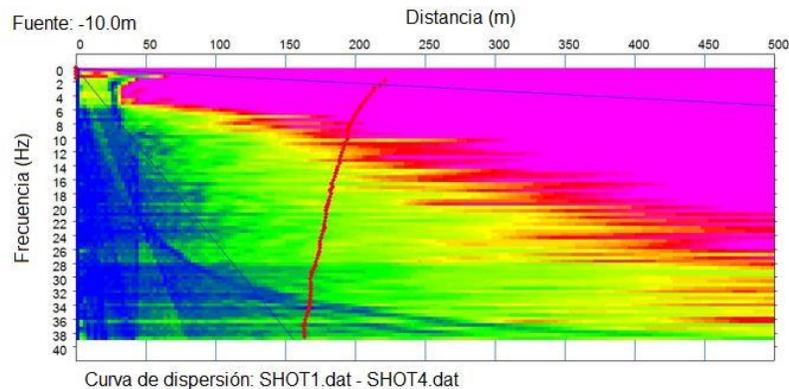
Seguidamente se establece la geometría espacial en donde se introduce el espaciado entre geófonos y el número de canales, para esta zona fue de 1m y 24 canales respectivamente (ver figura 49).

Figura 49. Geometría espacial línea MASW y ReMi.



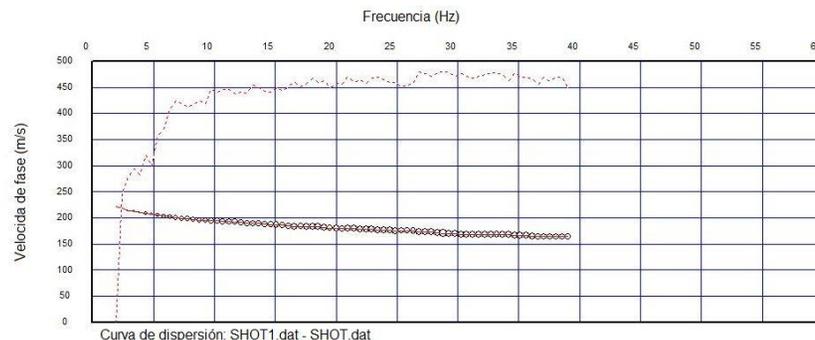
Fuente: autores.

El siguiente paso es generar la curva de dispersión, para la cual es necesaria la transformación en frecuencia-velocidad de fase (ver figura 50), seleccionando esta opción en el software en la cual se introducen los valores máximos posibles de velocidad (500m/s) y frecuencia de (40Hz) en el terreno y se realiza el picado (puntos rojos).

Figura 50. Curva frecuencia-velocidad de Fase línea 1 MASW y ReMi.

Fuente: autores.

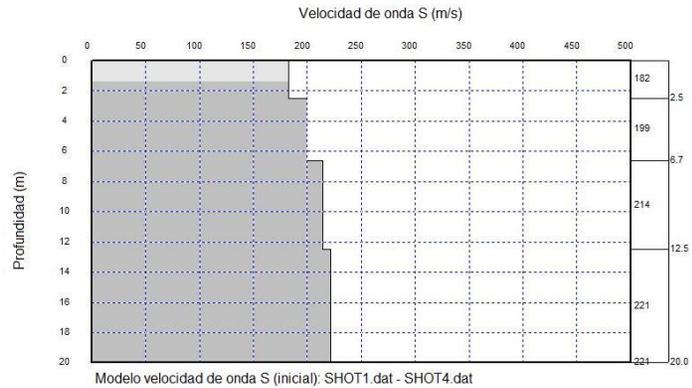
Una vez realizado el picado, se procede a la obtención de la curva de dispersión, al seleccionar la opción se abre el modulo WaveEq (Surface Wave Analysis) ver tabla 13, el cual muestra la curva como se ilustra en la figura 51.

Figura 51. Curva de dispersión línea 1 MASW y ReMi.

Fuente: autores.

Esta curva es indispensable para obtener el perfil de velocidades de onda S, antes de obtener este último es necesario generar un modelo inicial (ver figura 52) de estas velocidades, introduciendo la profundidad 20m y el número de capas 5.

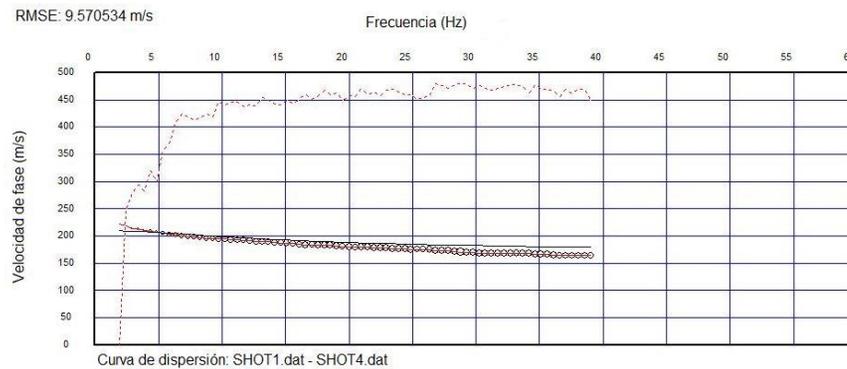
Figura 52. Modelo inicial de Velocidades de onda S para ReMi.



Fuente: autores.

En la figura 53 se muestra la curva de dispersión la cual contiene el error RMSE antes de realizarse la inversión del modelo inicial.

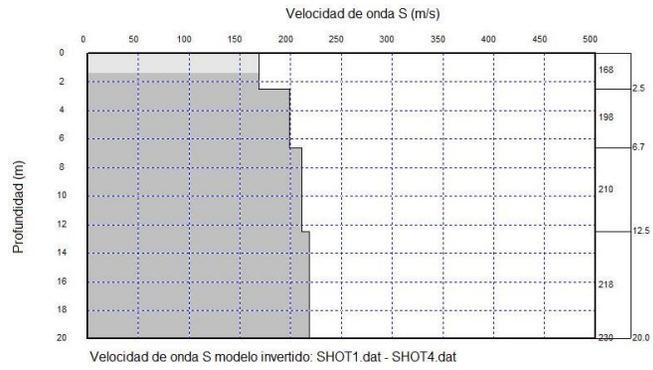
Figura 53. Curva de dispersión con error RMSE antes de la inversión línea 1 MASW y ReMi.



Fuente: autores.

Luego de generado el modelo inicial se hace la inversión del mismo con el fin de obtener el perfil final de velocidades de onda S, ver figura 54.

Figura 54. Modelo final de velocidades de onda S para ReMi.



Fuente: autores.

CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA, REFLEXIÓN SÍSMICA, MASW Y REMI EN DEPÓSITOS SUPERFICIALES Y ZONAS CRÍTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA.

*Capítulo 6.
Análisis e
interpretación de
resultados.*

6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

En esta sección se divide en dos fases, en la primera se obtendrán las respectivas velocidades de onda P y S para cada una de las zonas. En la segunda fase se hallan los parámetros del subsuelo descritos para esta investigación.

6.1 VELOCIDADES DE ONDA P Y S

Se usarán como guía las tablas 1 y 2 descritas en el capítulo 3 marco teórico, para clasificar el tipo de subsuelo según los valores de velocidad obtenidos en el capítulo anterior para cada una de las zonas, las cuales se muestran a continuación.

(Tabla 1. Tabla de velocidades de onda P (V_p)).

MATERIALES	VELOCIDADES
SUELOS Y ROCAS NATURALES	m/s
Material superficial meteorizado	240 - 610
Grava o arena seca	460 - 915
Arena (saturada)	1220 - 1830
Arcilla (saturada)	915 - 2750
Agua	1430 - 1665
Agua de mar	1460 - 1525
Arenisca	1830 - 3960
Esquisto	2750 - 4270
Tiza	1830 - 3960
Caliza	2134 - 6100
Granito	4575 - 5800
Roca metamórfica	3050 - 7000

Fuente: autores.

(Tabla 2. Tabla de velocidades de onda S (V_s)).

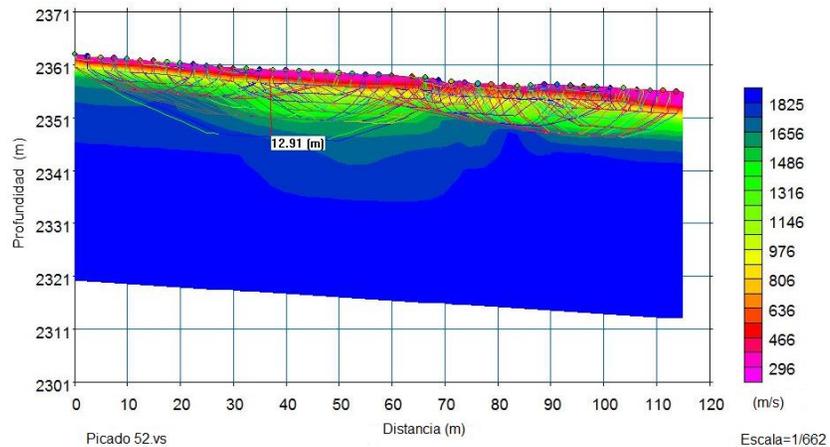
MATERIALES	Vs(m/s)
Material superficial y suelos incompetentes	50 - 150
Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)	150 - 350
Suelos muy competentes y gravas	350 - 600
Roca erosionada	600 - 800
Roca sólida	> 800

Fuente: autores.

6.1.1 ZONA 1: CANCHA DE FÚTBOL ALBERTO GONZALES.

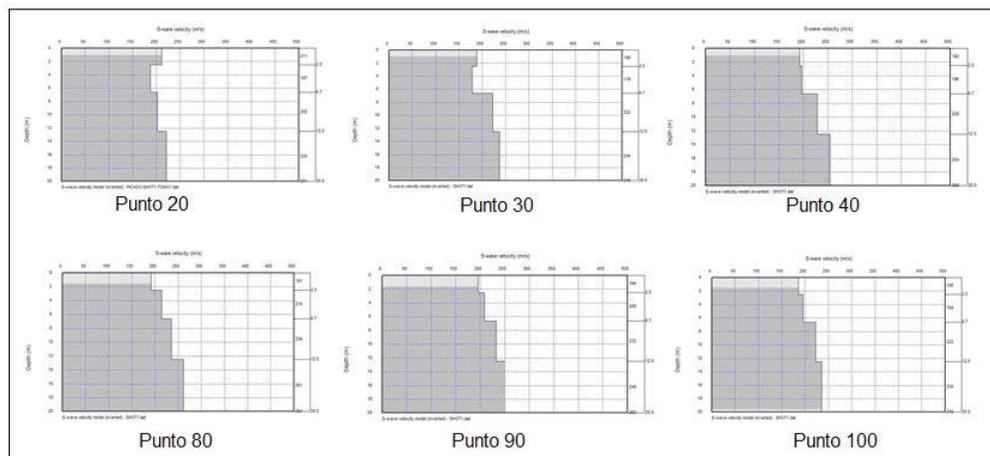
En las figuras 55 y 56 se observan los resultados de la obtención de velocidad de onda P y S, en los métodos de refracción sísmica y MASW respectivamente, para este último se muestran los perfiles finales de velocidad de onda S en cada punto de toma de la línea.

Figura 55. Perfil del subsuelo zona 1 con trayectoria de rayos y velocidades de onda P.



Fuente: autores.

Figura 56. Perfiles de velocidades de onda S en la zona 1.



Fuente: autores.

En la tabla 14 se encuentra el tipo de subsuelo según los valores de velocidades de onda P y S en la zona 1.

Tabla 14. Caracterización de la zona 1.

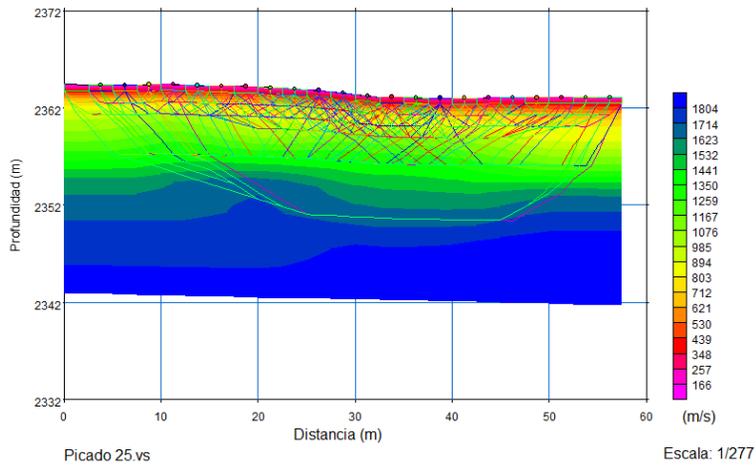
CAPAS	ESPESOR	V_p (m/s)	MATERIAL	V_s (m/s)	MATERIAL
Capa 1	0,75m	290-450	Material superficial meteorizado	50-210	<ul style="list-style-type: none"> Material superficial y suelos incompetentes Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 2	1,40m	450-630	<ul style="list-style-type: none"> Material superficial meteorizado Grava o arena seca 	210-190	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 3	2,14m	650-970	Grava o arena seca	190-200	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 4	8,62m	1100-1490	Arcilla (saturada)	200-220	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
...		220-230	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)

Fuente: autores.

6.1.2 ZONA 2: BIBLIOTECA PADRE JOSÉ RAFAEL FARÍA BERMÚDEZ

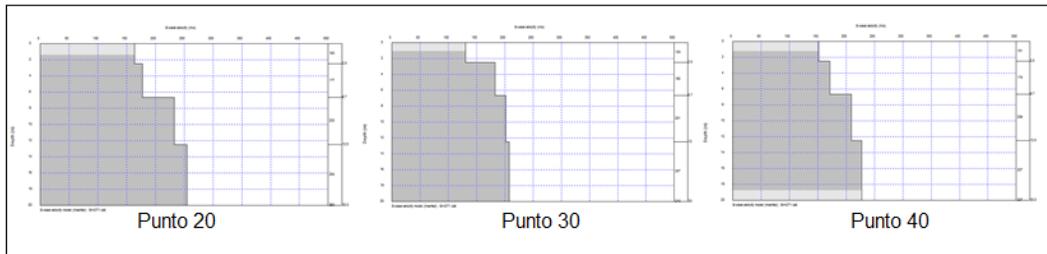
Los resultados de la obtención de velocidad de onda P y S, en los métodos de refracción sísmica y MASW se observan en las figuras 57 y 58.

Figura 57. Perfil del subsuelo zona 2 con trayectoria de rayos y velocidades de onda P.



Fuente: autores.

Figura 58. Perfiles de velocidades de onda S en la zona 2.



Fuente: autores.

La clasificación del subsuelo para la zona 2 se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Caracterización de la zona 2.

CAPAS	ESPESOR	V_p (m/s)	MATERIAL	V_s (m/s)	MATERIAL
Capa 1	0,21m	160-350	Material superficial meteorizado	50-180	Material superficial y suelos incompetentes
Capa 2	081m	350-500	<ul style="list-style-type: none"> Material superficial meteorizado Grava o arena seca 	180-170	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)

Continuación de la tabla 15.

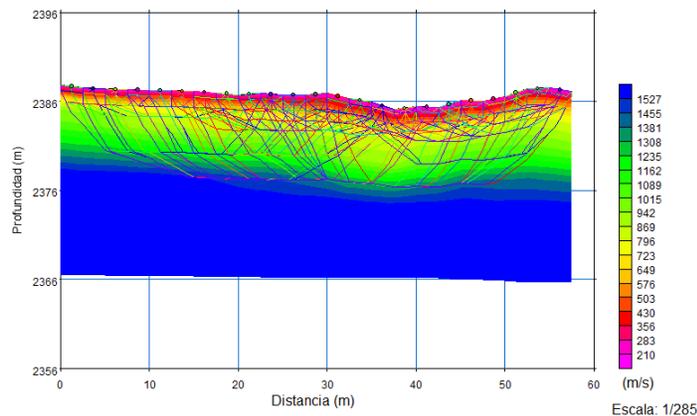
Capa 3	2,17m	530-650	Grava o arena seca	170-210	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 4	3,86m	710-890	Grava o arena seca	210-240	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 5	4,40m	890-1350	<ul style="list-style-type: none"> • Grava o arena seca • Arena saturada 	240-260	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)

Fuente: autores.

6.1.3 ZONA 3: EDIFICIO ADMINISTRATIVO CETA GENERAL LEONARDO CANAL GONZÁLES

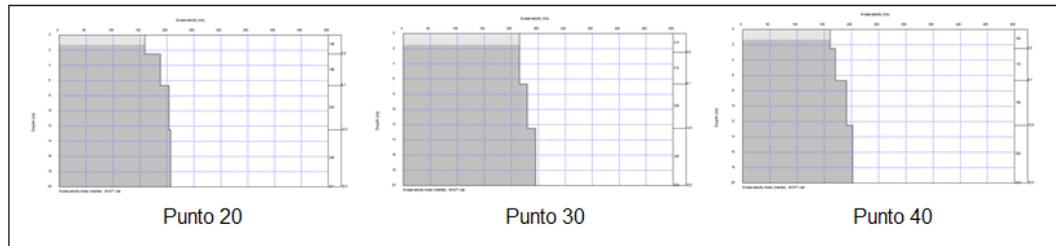
Las velocidades de onda P (ver figura 59) y S (ver figura 58), en los métodos de refracción sísmica y MASW.

Figura 59. Perfil del subsuelo zona 3 con trayectoria de rayos y velocidades de onda P.



Fuente: autores.

Figura 60. Perfiles de velocidades de onda S en la zona 3.



Fuente: autores.

En la tabla 16 se observa la caracterización del subsuelo y las velocidades de onda P y S para esta zona de estudio.

Tabla 16. Caracterización de la zona 3.

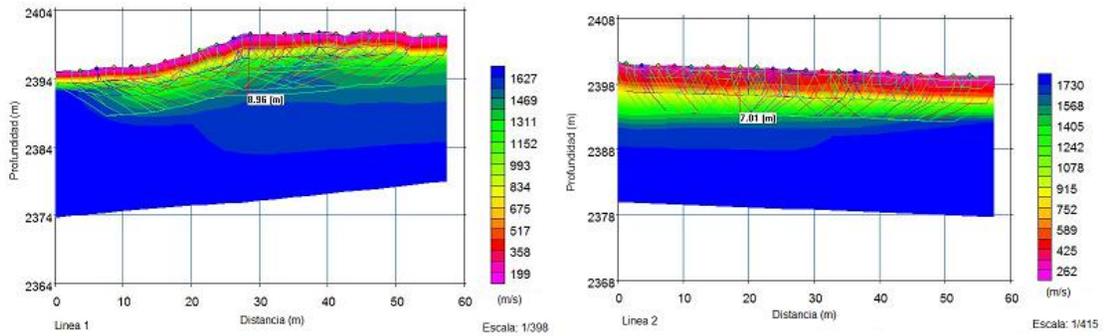
CAPAS	ESPESOR	V_p (m/s)	MATERIAL	V_s (m/s)	MATERIAL
Capa 1	0,40m	210-290	Material superficial meteorizado	50-150	Material superficial y suelos incompetentes
Capa 2	0,70m	300-430	<ul style="list-style-type: none"> Material superficial meteorizado 	150-220	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 3	1,63m	430-560	<ul style="list-style-type: none"> Material superficial meteorizado Grava o arena seca. 	220-230	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 4	2,63m	560-780	<ul style="list-style-type: none"> Material superficial meteorizado. Grava o arena seca 	230-250	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 5	2,50m	800-1240	<ul style="list-style-type: none"> Grava o arena seca Arena saturada 	250-260	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)

Fuente: autores.

6.1.4 ZONA 4: EDIFICIO JORGE GAITÁN DURÁN

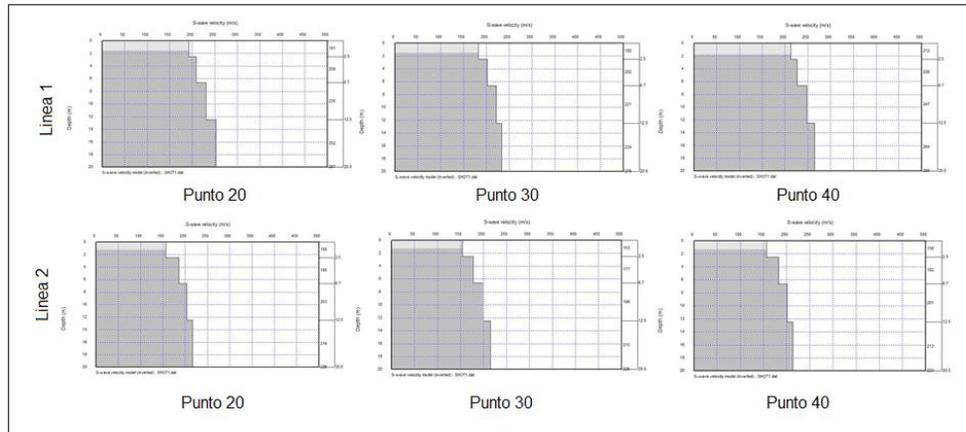
Esta zona de estudio se divide en dos líneas de 60m como se aprecia en la figura 61, en las cuales se pueden observar las velocidades de onda P, en la figura 62 se muestran los perfiles de velocidad de onda S para estas mismas líneas en los puntos especificados.

Figura 61. Perfil del subsuelo zona 4 con trayectoria de rayos y velocidades de onda P.



Fuente: autores.

Figura 62. Perfiles de velocidades de onda S en la zona 4.



Fuente: autores.

Tabla 17 caracterización del subsuelo con las velocidades de onda P y S, para la zona 4.

Tabla 17. Caracterización de la zona 4.

CAPAS	ESPESOR	V_p (m/s)	MATERIAL	V_s (m/s)	MATERIAL
LÍNEA 1					
Capa 1	0,70m	200-350	Material superficial meteorizado	50-190	Material superficial y suelos incompetentes
Capa 2	0,85m	350-520	<ul style="list-style-type: none"> • Material superficial meteorizado • Grava o arena seca. 	190-210	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 3	1m	520-700	Grava o arena seca.	210-230	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 4	2,23m	990-1160	Arcilla saturada.	230-250	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 5	3,82m	1160-1470	Arena saturada	250-270	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
LÍNEA 2					
Capa 1	0,62m	260-420	Material superficial meteorizado.	50-160	Material superficial y suelos incompetentes
Capa 2	0,98m	420-570	<ul style="list-style-type: none"> • Material superficial meteorizado. • Grava o arena seca. 	160-190	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 3	1,05m	570-730	Grava o arena seca.	190-200	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 4	1,5m	730-920	Grava o arena seca.	200-220	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)

Continuación de la tabla 17.

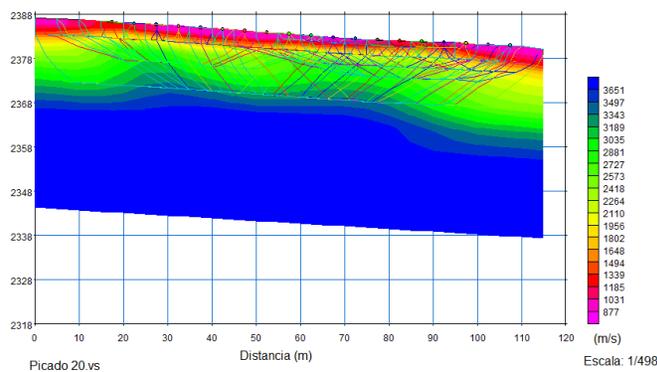
Capa 5	2,86m	920-1400	Arcilla saturada	220-230	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
--------	-------	----------	------------------	---------	----------------------------------------------

Fuente: autores.

6.1.5 ZONA 5: VÍA BUCARAMANGA.

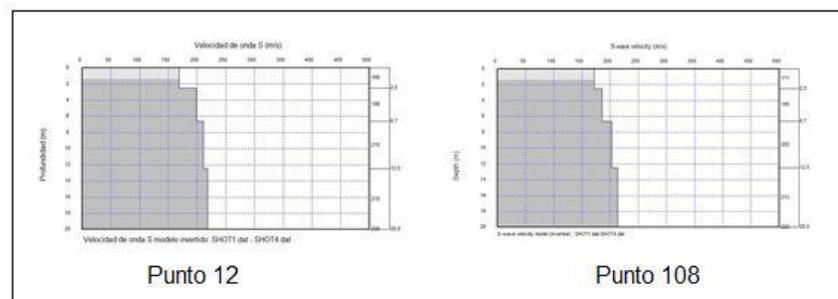
Para esta zona se muestra el trazado de rayos por donde se desplazan las ondas P (ver figura 63). en la figura 64 se muestran los perfiles de velocidad de onda S valores que se obtuvieron del procesamiento conjunto de MASW y ReMi.

Figura 63. Perfil del subsuelo zona 5 con trayectoria de rayos y velocidades de onda P.



Fuente: autores.

Figura 64. Perfiles de velocidades de onda S en la zona 5.



Fuente: autores.

Tabla 18. Caracterización de la zona 5.

CAPAS	ESPESOR	V_p (m/s)	MATERIAL	V_s (m/s)	MATERIAL
Capa 1	0,82m	870-1030	Grava o arena seca	50-240	<ul style="list-style-type: none"> Material superficial y suelos incompetentes Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 2	1,34m	1030-1340	Arena saturada.	240-210	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 3	1,72m	1340-1650	<ul style="list-style-type: none"> Arena saturada. Arcilla saturada. 	210-270	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 4	2,30m	1650-2110	<ul style="list-style-type: none"> Arcilla saturada Areniscas. 	270-280	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 5	2,89m	2270-2730	<ul style="list-style-type: none"> Areniscas. Tiza. 	280-290	Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)
Capa 6	3,40m	2730-3340	<ul style="list-style-type: none"> Areniscas. Tiza. Caliza.

Fuente: autores.

6.2 PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SUELO

Una vez establecidas las velocidades de onda P y S se realizan los cálculos en base a las ecuaciones ya establecidas en el capítulo 3 marco teórico (3.7 Parámetros dinámicos del suelo). Con fines prácticos se realizan tablas en las que se especifican los valores de dichos parámetros.

La obtención de estos parámetros se realizó para cada zona de estudio, las cuales se discriminaron por capas como se aprecia en las tablas 19, 20, 21, 22, 23 y 24 respectivamente.

6.2.1 ZONA 1: CANCHA DE FÚTBOL ALBERTO GONZALES
Tabla 19. Parámetros dinámicos del suelo para la zona 1.

PARÁMETRO	VALOR
CAPA 1	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	7,52-236
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	1,88-59
Módulo de Poisson (σ)	0,485-0,361
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	4470-78851
Densidad del terreno (kg/m^3)	1788
Módulo de Young (E) (Pa)	13276-214632
CAPA 2	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	236-185
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	59-46.25
Módulo de Poisson (σ)	0,361-0,45
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	79115-64763
Densidad del terreno (kg/m^3)	1794
Módulo de Young (E) (Pa)	215351-187813
CAPA 3	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	185-209
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	46,25-52,25
Módulo de Poisson (σ)	0,45-0,478
Módulo de rigidez (G)	65197-72240
Densidad del terreno (kg/m^3)	1806
Módulo de Young (E) (Pa)	189071-213541
CAPA 4	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	209-263
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	52,25-65,75
Módulo de Poisson (σ)	0,483-0,489
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	72520-87750
Densidad del terreno (kg/m^3)	1813

Continuación de la tabla 19.

Módulo de Young (E) (Pa)	215093-261319
CAPA 5	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	263-293
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	65,75-73,25
Módulo de Poisson (σ)	----
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	87943-96119
Densidad del terreno (kg/m^3)	1817
Módulo de Young (E) (Pa)	----

Fuente: autores.

6.2.2 ZONA 2: BIBLIOTECA PADRE JOSÉ RAFAEL FARÍA BERMÚDEZ

Tabla 20. Parámetros dinámicos del subsuelo para la zona 2.

PARÁMETRO	VALOR
CAPA 1	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	7,52-163
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	1.88-40.75
Módulo de Poisson (σ)	0,446-0,320
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	4453-55704
Densidad del terreno (kg/m^3)	1781
Módulo de Young (E) (Pa)	12878-147059
CAPA 2	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	163-142
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	40,75-35,5
Módulo de Poisson (σ)	0,320-0,435
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	57931-51673
Densidad del terreno (kg/m^3)	1788
Módulo de Young (E) (Pa)	152938-148301

Continuación de la tabla 20.

CAPA 3	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	142-236
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	35,5-59
Módulo de Poisson (σ)	0,443-0,442
Módulo de rigidez (G)	52078-79468
Densidad del terreno (kg/m^3)	1802
Módulo de Young (E) (Pa)	150297-229186
CAPA 4	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	236-324
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	59-81
Módulo de Poisson (σ)	0,452-0,461
Módulo de rigidez (G) kN/m^2)	79777-104198
Densidad del terreno (kg/m^3)	1809
Módulo de Young (E) (Pa)	231672-304467
CAPA 5	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	324-393
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	81-98,25
Módulo de Poisson (σ)	0,461-0,481
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	104198-122288
Densidad del terreno (kg/m^3)	1809
Módulo de Young (E) (Pa)	304467-362217

Fuente: autores.

6.2.3 ZONA 3: EDIFICIO ADMINISTRATIVO CETA GENERAL LEONARDO CANAL GONZÁLES

Tabla 21. Parámetros dinámicos del subsuelo para la zona 3.

PARÁMETRO	VALOR
CAPA 1	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	7,52-105
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	1,88-26,25
Módulo de Poisson (σ)	0,469-0,317
Módulo de rigidez (G) (kN/m ²)	4455-45619
Densidad del terreno (kg/m ³)	1782
Módulo de Young (E) (Pa)	13089-120160
CAPA 2	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	105-263
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	26,25-65,75
Módulo de Poisson (σ)	0,333-0,323
Módulo de rigidez (G) (kN/m ²)	45798-64593
Densidad del terreno (kg/m ³)	1789
Módulo de Young (E) (Pa)	122097-170913
CAPA 3	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	263-293
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	65,75-73,25
Módulo de Poisson (σ)	0,323-0,398
Módulo de rigidez (G) (kN/m ²)	64330-71280
Densidad del terreno (kg/m ³)	1792
Módulo de Young (E) (Pa)	170271-199299
CAPA 4	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	293-358
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	73,25-89,5

Continuación de la tabla 21.

Módulo de Poisson (σ)	0,398-0,443
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	71280-86249
Densidad del terreno (kg/m^3)	1792
Módulo de Young (E) (Pa)	199299-248915
CAPA 5	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	358-393
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	89,5-98,28
Módulo de Poisson (σ)	0,446-0,477
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	86249-94268
Densidad del terreno (kg/m^3)	1792
Módulo de Young (E) (Pa)	249432-278468

Fuente: autores.

6.2.4 ZONA 4: EDIFICIO JORGE GAITÁN DURÁN

En esta zona se realizó el cálculo de los parámetros en dos líneas de 60m como se muestra en las tablas 22 y 23.

Tabla 22. Parámetros dinámicos de subsuelo para la zona 4 Línea 1.

PARÁMETRO	VALOR
CAPA 1	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	7,52-185
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	1,88-46.25
Módulo de Poisson (σ)	0,467-0,291
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	4473-64583
Densidad del terreno (kg/m^3)	1789
Módulo de Young (E) (Pa)	13124-184578
CAPA 2	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	185-236
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	46,25-59

Continuación de la tabla 22.

Módulo de Poisson (σ)	0,291-0,402
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	64799-79159
Densidad del terreno (kg/m^3)	1795
Módulo de Young (E) (Pa)	167311-221962
CAPA 3	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	236-293
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	59-73.25
Módulo de Poisson (σ)	0,402-0,439
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	79512-95379
Densidad del terreno (kg/m^3)	1803
Módulo de Young (E) (Pa)	222952-274501
CAPA 4	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	293-358
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	73,25-89,5
Módulo de Poisson (σ)	0,471-0,476
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	95749-113125
Densidad del terreno (kg/m^3)	1810
Módulo de Young (E) (Pa)	281694-333945
CAPA 5	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	358-430
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	89,5-107,5
Módulo de Poisson (σ)	0,476-0,482
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	113438-132313
Densidad del terreno (kg/m^3)	1815
Módulo de Young (E) (Pa)	334869-392176

Fuente: autores.

Tabla 23. Parámetros dinámicos de subsuelo para la zona 4 Línea 2

PARÁMETRO	VALOR
CAPA 1	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	7,52-123
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	1,88-30,75
Módulo de Poisson (σ)	0,481-0,415
Módulo de rigidez (G) (kN/m ²)	4452-45594
Densidad del terreno (kg/m ³)	1781
Módulo de Young (E) (Pa)	13187-129031
CAPA 2	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	123-185
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	30,75-46,25
Módulo de Poisson (σ)	0,415-0,437
Módulo de rigidez (G) (kN/m ²)	45747-64511
Densidad del terreno (kg/m ³)	1787
Módulo de Young (E) (Pa)	129464-185404
CAPA 3	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	185-209
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	46,25-52,25
Módulo de Poisson (σ)	0,437-0,46
Módulo de rigidez (G) (kN/m ²)	64799-71800
Densidad del terreno (kg/m ³)	1795
Módulo de Young (E) (Pa)	186232-209656
CAPA 4	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	209-263
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	52,25-65,75
Módulo de Poisson (σ)	0,46-0,47
Módulo de rigidez (G) kN/m ²)	71880-86975
Densidad del terreno (kg/m ³)	1797
Módulo de Young (E) (Pa)	209889-255707

Continuación de la tabla 23.

CAPA 5	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	263-293
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	65,75-73,25
Módulo de Poisson (σ)	0,47-0,486
Módulo de rigidez (G) (kN/m ²)	86975-95061
Densidad del terreno (kg/m ³)	1797
Módulo de Young (E) (Pa)	255707-282521

Fuente: autores.

6.2.5 ZONA 5: VÍA BUCARAMANGA

Tabla 24. Parámetros dinámicos de subsuelo para la zona 5.

PARÁMETRO	VALOR
CAPA 1	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	7,52-324
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	1,88-81
Módulo de Poisson (σ)	0,498-0,486
Módulo de rigidez (G) (kN/m ²)	4463-51586
Densidad del terreno (kg/m ³)	1785
Módulo de Young (E) (Pa)	13371-153313
CAPA 2	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	324-236
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	81-59
Módulo de Poisson (σ)	0,486-0,489
Módulo de rigidez (G) (kN/m ²)	51788-71768
Densidad del terreno (kg/m ³)	1792
Módulo de Young (E) (Pa)	153914-52913

Continuación de la tabla 24.

CAPA 3	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	236-430
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	59-107,5
Módulo de Poisson (σ)	0,489-0,492
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	71880-79248
Densidad del terreno (kg/m^3)	1797
Módulo de Young (E) (Pa)	214059-236476
CAPA 4	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	430-470
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	107,5-117,5
Módulo de Poisson (σ)	0,492-0,495
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	79336-87072
Densidad del terreno (kg/m^3)	1799
Módulo de Young (E) (Pa)	236739-260345
CAPA 5	
Capacidad portante ultima (q_f) (kPa).	470-511
Capacidad portante admisible (q_a) (kPa).	117,5-127,75
Módulo de Poisson (σ)	0,495-0,496
Módulo de rigidez (G) (kN/m^2)	87072-95167
Densidad del terreno (kg/m^3)	1799
Módulo de Young (E) (Pa)	260345-284739

Fuente: autores.

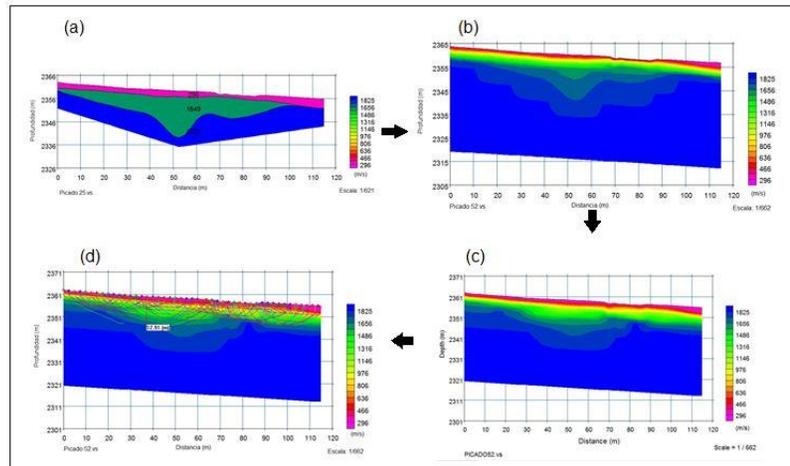
6.3 PERFILES OBTENIDOS

En esta sección se muestran los resultados de los perfiles obtenidos de los métodos que se aplicaron a cada una de las zonas de estudio. Los cuales se desglosarán por zonas y a su vez en método.

6.3.1 ZONA 1: CANCHA DE FÚTBOL ALBERTO GONZALES

En la figura 65 se evidencia el procesamiento y el resultado del perfil obtenido en el método de refracción sísmica para la zona 1.

Figura 65. Refracción para la zona 1.

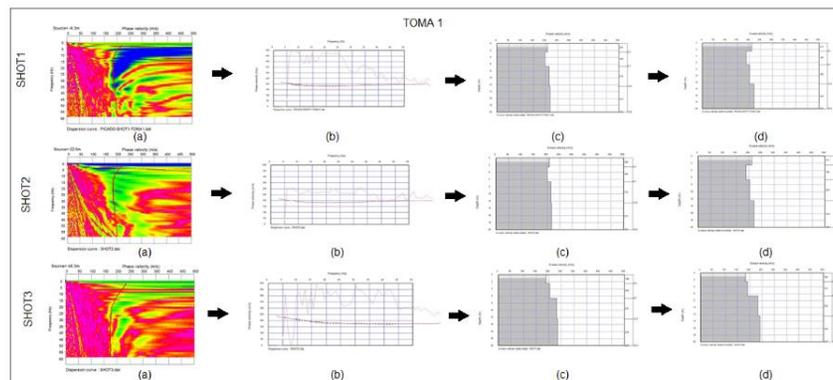


Fuente: autores.

El procesamiento de MASW para la zona 1, se realizaron dos líneas las cuales se dividieron en tres tomas cada una, en las figuras 66, 67 y 68 se observa el procesamiento y resultado obtenido para la toma 1, toma 2 y toma 3 de la línea 1 respectivamente; por cada toma se realizaron 3 shots.

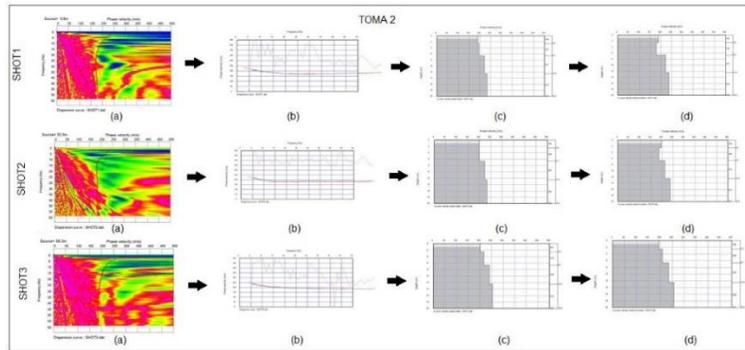
6.3.1.1 LÍNEA 1, ZONA 1 CANCHA DE FÚTBOL ALBERTO GONZALES

Figura 66. MASW para la zona 1 correspondiente a la toma 1, línea 1.



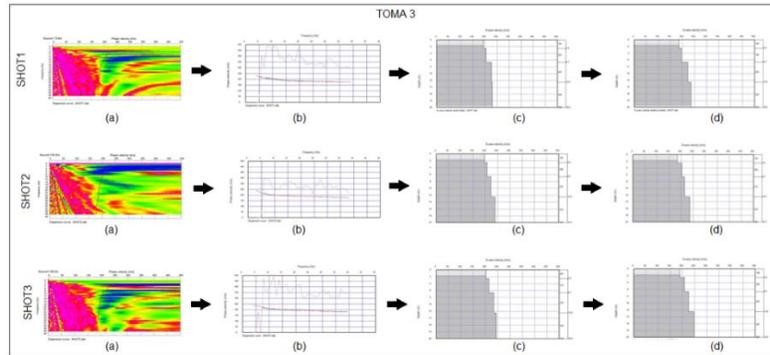
Fuente: autores.

Figura 67. MASW para la zona 1 correspondiente a la toma 2, línea 1.



Fuente: autores.

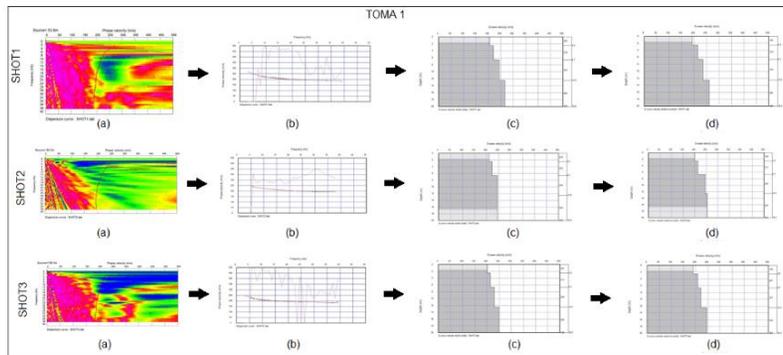
Figura 68. MASW para la zona 1 correspondiente a la toma 3, línea 1.



Fuente: autores.

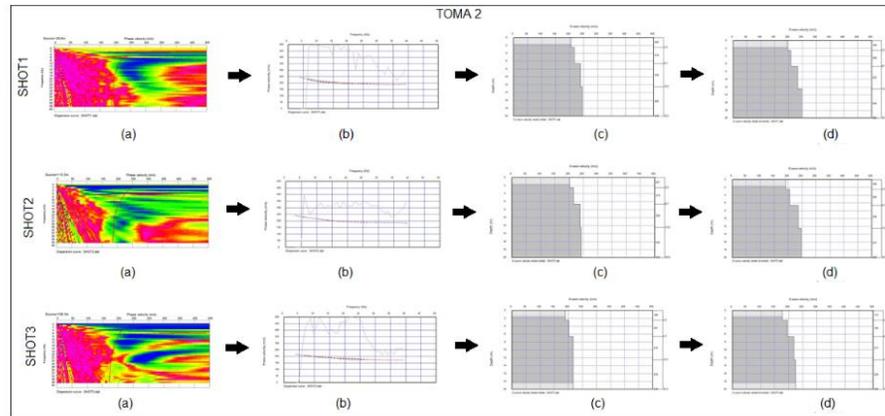
6.3.1.2 LÍNEA 2, ZONA 1 CANCHA DE FÚTBOL ALBERTO GONZALES

Figura 69. MASW para la zona 1 correspondiente a la toma 1, línea 2.



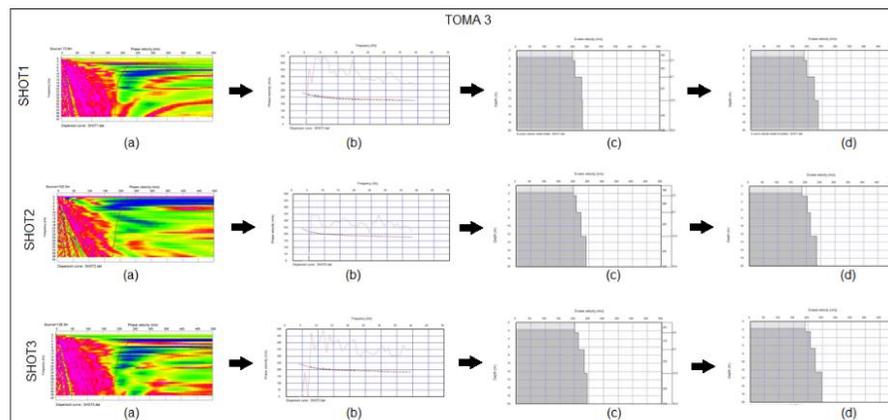
Fuente: autores.

Figura 70. MASW para la zona 1 correspondiente a la toma 2, línea 2.



Fuente: autores.

Figura 71. MASW para la zona 1 correspondiente a la toma 3, línea 2.

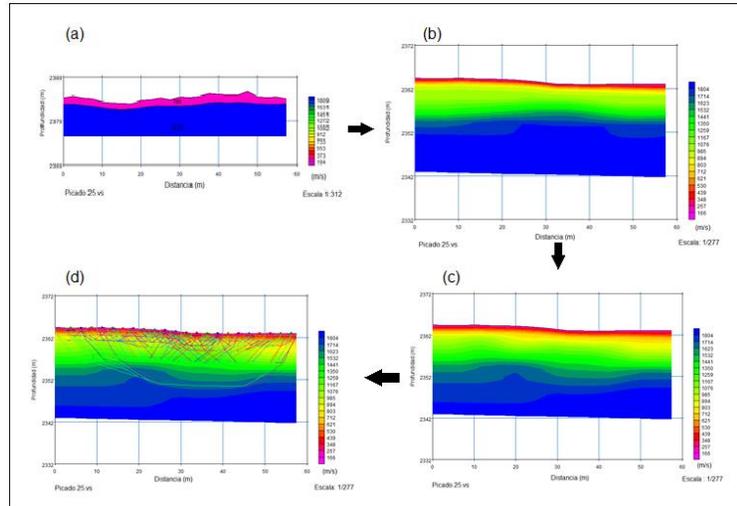


Fuente: autores.

6.3.2 ZONA 2: BIBLIOTECA PADRE JOSÉ RAFAEL FARÍA BERMÚDEZ

El procesamiento y el resultado obtenido en el método de refracción sísmica se evidencian en la figura 72.

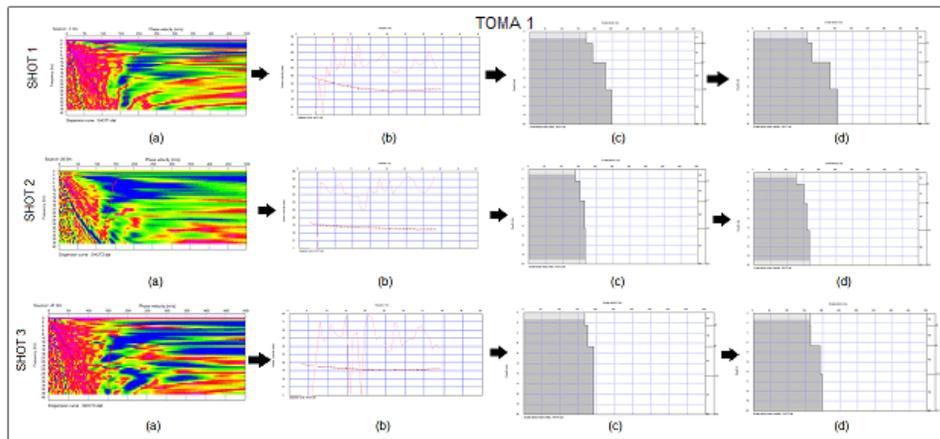
Figura 72. Refracción sísmica para la zona 2.



Fuente: autores.

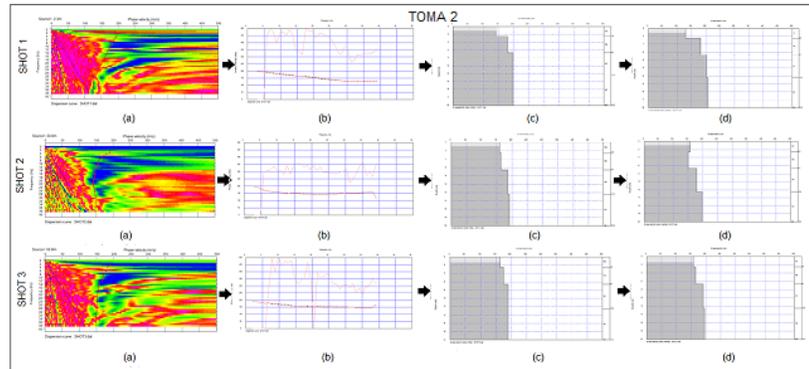
En el procesamiento de MASW para la zona 2, se realizó de igual forma donde se hicieron dos líneas las cuales se dividieron en tres tomas cada una, en las figuras 73, 74 y 75.

Figura 73. MASW para la zona 2 correspondiente a la toma 1, línea 1.



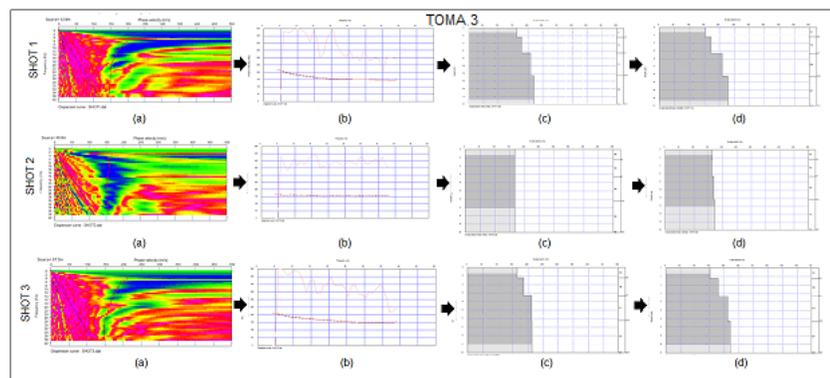
Fuente: autores.

Figura 74. MASW para la zona 2 correspondiente a la toma 2, línea 1.



Fuente: autores.

Figura 75. MASW para la zona 2 correspondiente a la toma 3, línea 1.

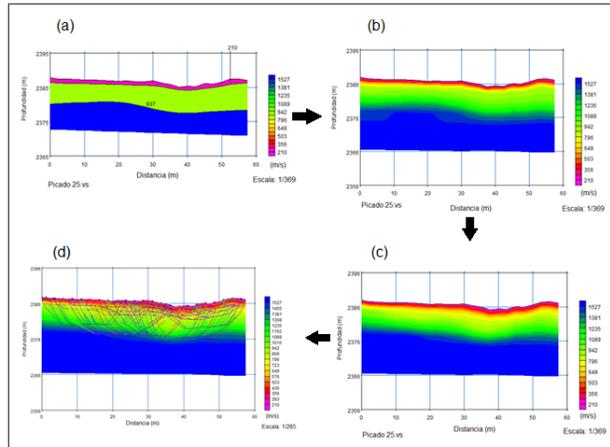


Fuente: autores.

6.3.3 ZONA 3: EDIFICIO ADMINISTRATIVO CETA GENERAL LEONARDO CANAL GONZÁLES

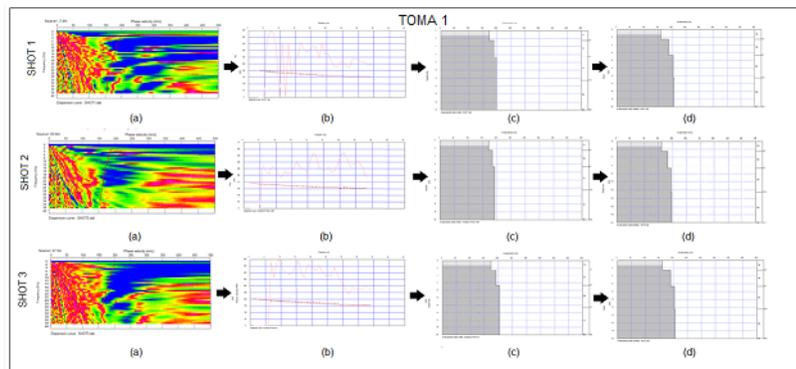
El procesamiento y los resultados se realizaron de la misma manera que las zonas anteriores (ver figuras 76, 77, 78 y 79).

Figura 76. Refracción sísmica para la zona 3.



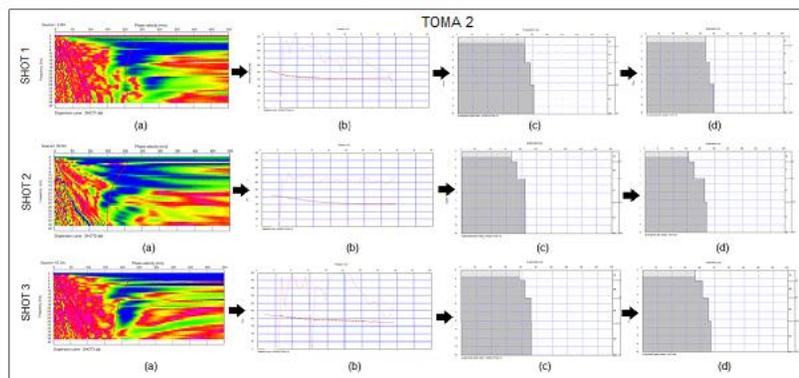
Fuente: autores.

Figura 77. MASW para la zona 3 correspondiente a la toma 1, línea 1.



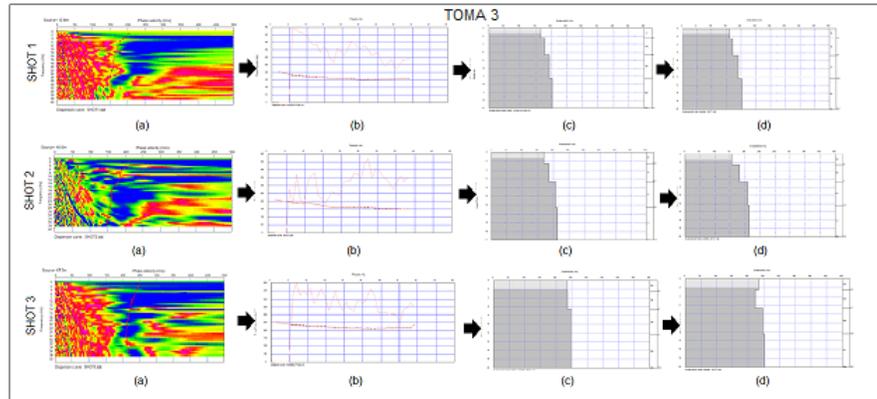
Fuente: autores.

Figura 78. MASW para la zona 3 correspondiente a la toma 2, línea 1.



Fuente: autores.

Figura 79. MASW para la zona 3 correspondiente a la toma 3, línea 1.



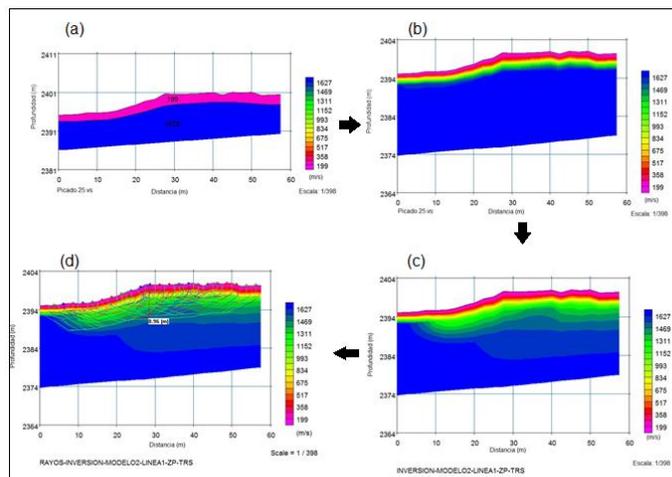
Fuente: autores.

6.3.4 ZONA 4: EDIFICIO JORGE ELIECER GAITÁN DURÁN

En procesamiento y resultados de esta zona para refracción sísmica se evidencia en las figuras 80 y 81 donde la zona fue dividida en dos líneas de 60m.

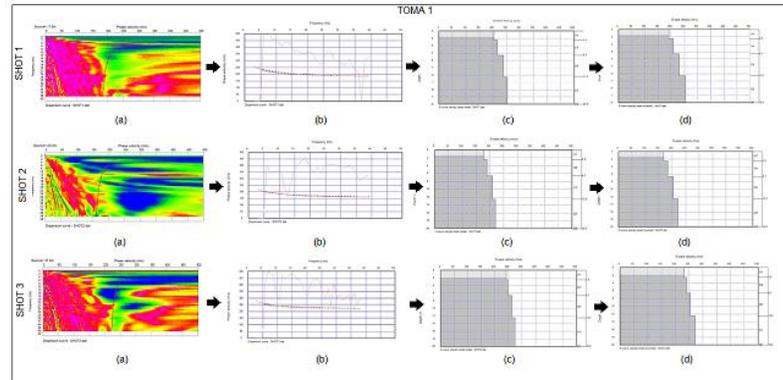
6.3.4.1 LÍNEA 1, ZONA 4 EDIFICIO JORGE ELIECER GAITÁN DURÁN

Figura 80. Refracción sísmica para la zona 4 línea 1.



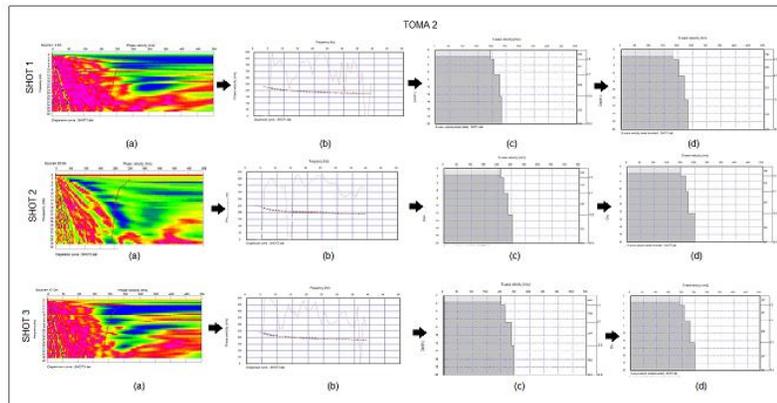
Fuente: autores.

Figura 81. MASW para la zona 4 correspondiente a la toma 1, línea 1.



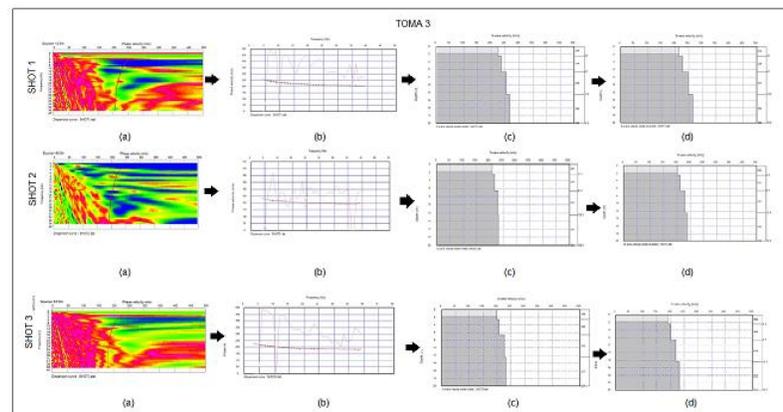
Fuente: autores.

Figura 82. MASW para la zona 4 correspondiente a la toma 2, línea 1.



Fuente: autores.

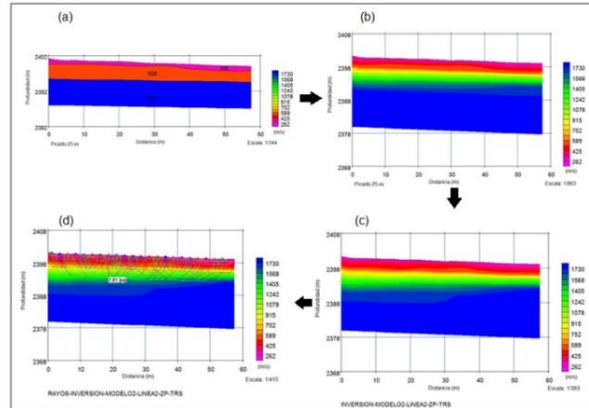
Figura 83. MASW para la zona 4 correspondiente a la toma 3, línea 1.



Fuente: autores.

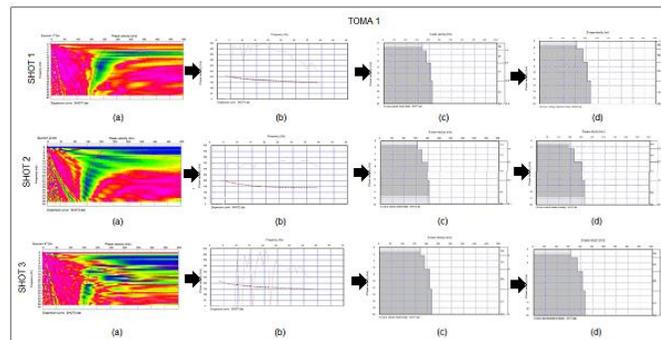
6.3.4.2 LÍNEA 2, ZONA 4 EDIFICIO JORGE ELIECER GAITÁN DURÁN

Figura 84. Refracción sísmica para la zona 4 línea 2.



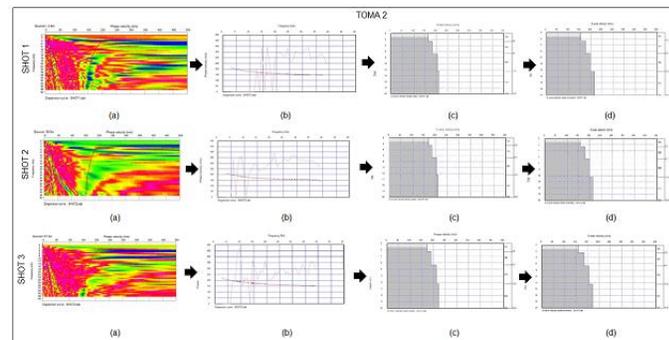
Fuente: autores.

Figura 85. MASW para la zona 4 correspondiente a la toma 1, línea 2



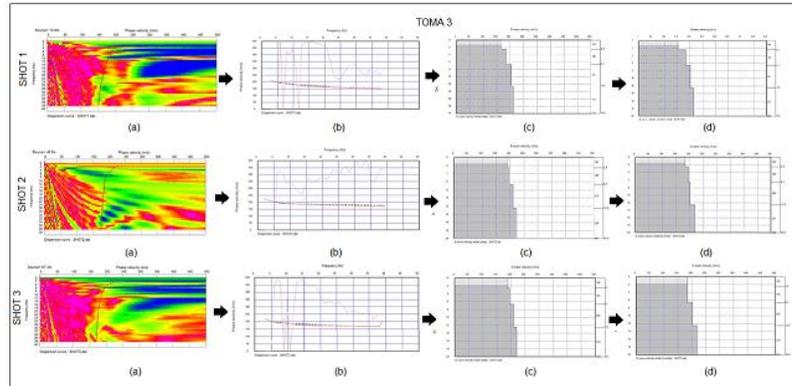
Fuente: autores.

Figura 86. MASW para la zona 4 correspondiente a la toma 2, línea 2



Fuente: autores.

Figura 87. MASW para la zona 4 correspondiente a la toma 3, línea 2

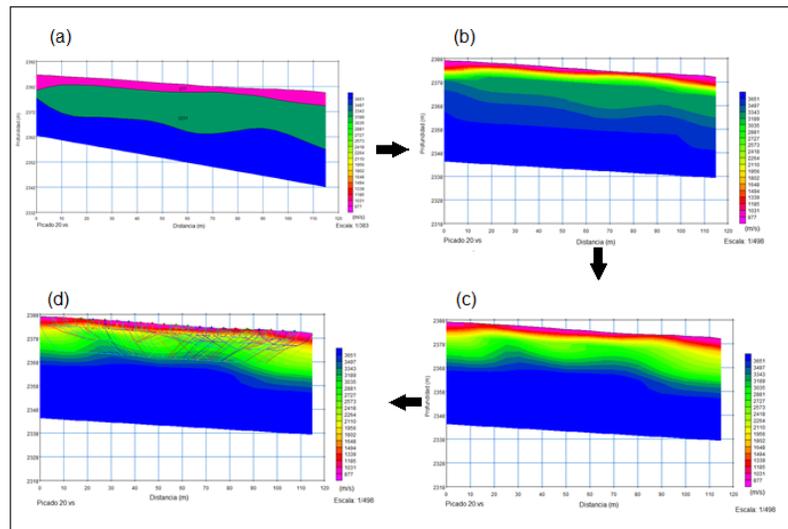


Fuente: autores.

6.3.5 ZONA 5: VÍA BUCARAMANGA

El procesamiento de refracción sísmica para la zona 5 se observa en la figura 88.

Figura 88 Refracción sísmica para la zona 5.

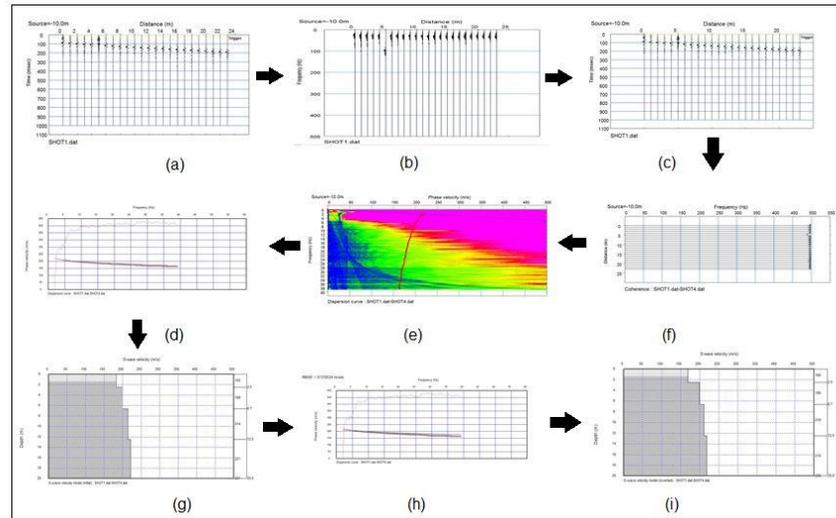


Fuente: autores.

En esta zona se realizó el procesamiento de MASW y ReMi conjuntamente, en las figuras 89 y 90 se aprecia dicho procesamiento para la línea 1 y 2 respectivamente.

6.3.5.1 LÍNEA 1, ZONA 5 VIA-BUCARAMANGA.

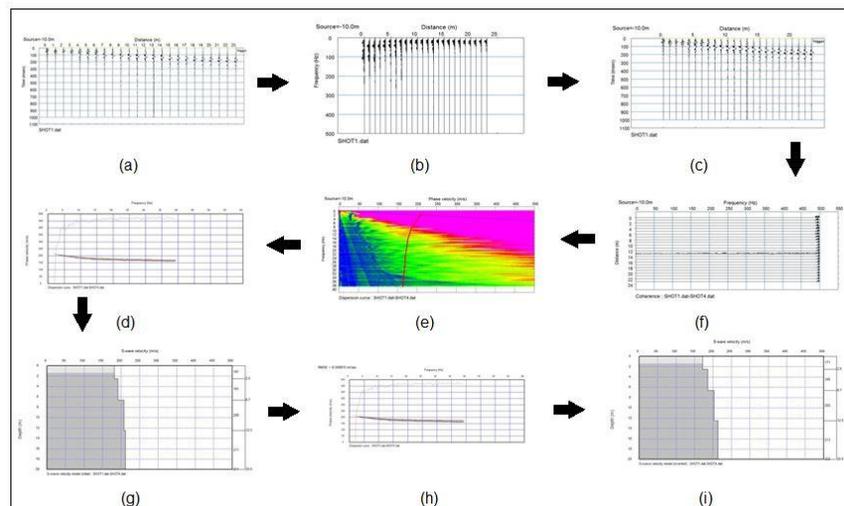
Figura 89. MASW y ReMi para la zona 5 correspondiente a la toma 1, línea 1.



Fuente: autores.

6.3.5.2 LÍNEA 2, ZONA 5 VIA-BUCARAMANGA.

Figura 90. MASW y ReMi para la zona 5 correspondiente a la toma 1, línea 2.



Fuente: autores.

6.4 ANALISIS DE RESULTADOS

Con los parámetros dinámicos del subsuelo obtenidos en el desarrollo de esta investigación, se puede dar una breve descripción del subsuelo presente en las zonas de estudio y una posible causa de las fallas en algunas de estas zonas.

6.4.1 ANÁLISIS PARA LA ZONA 1 CANCHA DE FÚTBOL ALBERTO GONZALES

La clasificación del subsuelo en esta zona (ver figura 91) se hizo por capas, el posible tipo de suelo presente en la capa 1 es material superficial meteorizado, la capa 2 y 3 presenta grava y en la capa 4 predomina la arcilla saturada lo que indica la posible existencia de nivel freático. La máxima capacidad portante admisible encontrada a una profundidad de 12,5m fue de 73,25 kPa, no es recomendable realizar construcciones en esta zona ya que la capacidad presente no es óptima.

Figura 91. Análisis zona 1 cancha de fútbol Alberto Gonzales.



Fuente: autores.

6.4.2 ANÁLISIS PARA LA ZONA 2 BIBLIOTECA PADRE JOSÉ RAFAEL FARÍA BERMÚDEZ

El tipo de suelo presente en cada una de las capas determinadas en esta zona es el siguiente: capa 1 presenta material superficial meteorizado, capa 2,3 y 4 grava o arena seca y la capa 5 arena saturada. Por la cercanía que se presenta entre la zona 1 y la zona 2 y la poca diferencia de profundidad alcanzada por lo tanto los parámetros de estas zonas son similares incluyendo la capacidad (73,25 kPa), a raíz de esto el edificio de la biblioteca sufrió asentamientos los cuales fueron evidentes en la estructura, esto conllevó a la construcción de un muro de contención

hace algunos años en la figura 92 se puede observar el muro de contención existente (grafitis).

Figura 92. Análisis zona 2 Biblioteca Padre José Rafael Faría Bermúdez.



Fuente: autores.

6.4.3 ANÁLISIS PARA LA ZONA 3 EDIFICIO ADMINISTRATIVO CETA GENERAL LEONARDO CANAL GONZÁLES.

Esta zona es una de las que más presenta fallas estructurales, según los parámetros dinámicos que se obtuvieron se puede concluir que la capacidad portante del subsuelo en esta zona es aceptable (98,28 kPa) a una profundidad de 7,86m, una de las posibles causas a las fallas presentes es que los cimientos se encuentran a poca profundidad por tal motivo la capacidad portante es baja comparada con el valor máximo alcanzado en esta investigación, además se evidencian errores constructivos, es decir, no se observa viga de cimentación lo que causo que el muro se descolgara, ocasionando así agrietamiento en la estructura como se aprecia en la figura 93 (a), (b), (c) y (d).

Figura 93 Análisis zona 3 Edificio Administrativo Ceta General Leonardo Canal Gonzáles.



Fuente: autores.

6.4.4 ANÁLISIS PARA LA ZONA 4 EDIFICIO JORGE ELIECER GAITÁN DURÁN Y ZONA 5 VIA-BUCARAMANGA

Por la cercanía de estas zonas se hizo el análisis en conjunto. El suelo que posiblemente predomina en la zona 4 capa 1 es material superficial meteorizado, para la capa 2 y 3 grava o arena seca, la capa 4 presenta arcilla saturada y en la capa 5 arena saturada, en las capas 4 y 5 puede haber una posible existencia de nivel freático. La profundidad máxima alcanzada en esta zona fue de 8,6m.

Una posible causa de la falla presente en la zona 4 (ver figura 94) es el paso del tráfico vehicular sobre la vía Bucaramanga el cual ocasiona empujes de tierra laterales, que fueron recibidos por dicho muro, dado que este no está diseñado para soportar estos esfuerzos.

En la zona 5 su clasificación por capas es la siguiente: capa 1 grava o arena seca, capa 2 arena saturada, capa 3 y 4 arcilla saturada y capa 5 areniscas con una profundidad máxima alcanzada de 12,47m. No obstante por la presencia de la vía la zona puede presentar material estabilizante, por tanto en esta zona no se evidencia material superficial meteorizado. La capacidad portante halla a la profundidad máxima alcanzada es de 511 kPa.

Figura 94. Análisis zona 4 Edificio Jorge Eliecer Gaitán Durán y zona 5 Vía-Bucaramanga.



Fuente: autores.



CONCLUSIONES

- Se realizó un barrido bibliográfico de cada uno de los métodos de aplicación en esta investigación y de las leyes que los rigen, basados en diferentes autores.
- Se diseñaron las líneas sísmicas para las cinco zonas de estudio con los parámetros que exige cada uno de los métodos, tales como: espaciamiento entre geófonos, tipo de geófono, ubicación de la fuente, número de golpes y longitud de las líneas. Posteriormente se realizó el montaje del equipo sísmico y se adquirieron los datos en campo induciendo las ondas con el número de golpes y ubicación de las fuentes ya establecidas.
- Una vez adquiridos los datos se realizó el procesamiento adecuado para cada método aplicando los fundamentos teóricos que establecen el adecuado manejo de los datos, cumpliendo con los errores mínimos establecidos para garantizar confiabilidad en los resultados.
- ReMi es un método de exploración sísmica pasivo ya que las ondas deben ser generadas de manera natural, cultural o industrial, debido a esto este método solo se aplicó en la zona 5 vía Bucaramanga aprovechando las vibraciones generadas por el paso vehicular las cuales fueron determinantes para la caracterización del subsuelo.
- La aplicación del método de refracción sísmica con fuente activa permitió la visualización de perfiles del subsuelo de manera clara, mostrando las capas existentes con sus respectivos espesores, obteniendo así valores de velocidad de onda P los cuales fueron de suma importancia para la caracterización y obtención del módulo de Poisson, este método permite alcanzar horizontalmente mayores longitudes.
- El método MASW utiliza la propagación de las ondas superficiales para obtener la velocidad de onda S, estos valores obtenidos fueron definitivos a la hora de conocer el tipo de subsuelo presente y hallar los parámetros característicos del subsuelo como: módulo de Young, módulo de Poisson, capacidad portante, módulo de rigidez.
- Con los resultados obtenidos de velocidad de onda P y S se clasificó el subsuelo mediante la utilización de tablas ya establecidas, determinando que el posible suelo que predomina en cada zona es arcilla, constatando así este resultado según la geología de la región.
- Se establecieron los parámetros del subsuelo tales como: capacidad portante, módulo de Poisson, módulo de rigidez, módulo de Young y densidad del terreno, utilizando fórmulas ya establecidas en función de las velocidades de onda P y



S, estos parámetros fueron indispensables a la hora de dar un posible resultado a las fallas presentes en las zonas de estudio de la universidad de Pamplona.

- Al realizar esta investigación se puede concluir que en base a las capacidades portantes obtenidas, estas no son las adecuadas para soportar las cargas a las que está sometido el subsuelo a la profundidad en la que se encuentran los cimientos, además de no haberse realizado un proceso constructivo adecuado incumpliendo así con el buen funcionamiento del conjunto suelo-estructura, a raíz de esto se presentan fallas en las zonas estudiadas.



BIBLIOGRAFÍA

BENTHAM OPEN. A Refined Formula for the Allowable Soil Pressure Using Shear Wave Velocities, Civil Engineering, Bogazici University, Bebek, Istanbul, Turkey, vol. 5, 2011, pág. 1-3.

CASALENA G. Mauro R. Caracterización geofísica del suelo somero mediante la aplicación del método de refracción por micro-tremores (ReMi) en la ciudad de Maracay- estado Aragua. Caracas, Venezuela. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. 2011. Pág. 22-37.

COMISION NACIONAL DEL AGUA. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. México 2007, pág. 31-64.

CORPONOR, Diagnostico Rural Pamplona Norte de Santander, <http://es.slideshare.net/kairope/capacidad-portante-de-suelos> [Consulta: viernes, 4 de marzo de 2016].

DAL MORO, Giancarlo. Surfase Wave Analisis for Near Surfase Applications. Italia: Elsevier, 2015, pág.1-37.

DE LA PEÑA; Rafael Bartolome. Evolución tectónica del margen continental Oeste de México: Fosa mesoamericana y Golfo de California. Barcelona, España. Tesis de Doctorado. Institut de Ciències de la Terra Aume Almera. 2002, pág.29-45.

GAYÁ FLOREZ, María Antoni. Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en el Complejo de Turbidítico en Ainsa (Huesca). Huesca España, Trabajo de grado. Universidad Politècnica de Catalunya, 2004, p.7-8.

GERRERO SANCHEZ, Ramsis Cecilia. Estudio de la dispersión de las ondas superficiales con fines geotécnicos. Colombia. Trabajo de grado. Universidad de los Andes. Pág. 48-49.

INGEOSOLUM, Refracción Sísmica Integrada Con Micro-tremor, 2011, <http://ingeosolum.blogspot.com.co/2011/12/refraccion-sismica-integrada-con.html> [Consulta: Jueves, 3 de marzo de 2016].

JAIMES VILLAMIZAR, José David. Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos. Bucaramanga, Colombia. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. 2011. Pág.25-73.

LINARES MOTENEGRO, Giselle Mercedes. Introducción y aplicación del método de sísmica de micro-tremores en áreas urbanas. Sartenejas, Venezuela. Trabajo de grado. Universidad Simón Bolívar. 2005. Pág. 15.



LOPEZ AVALOS, *et al.* Aplicación del método de Refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P. San Salvador, El Salvador. Trabajo de grado. Universidad de El Salvador. 2008, pág. 35-40.

LOWRIE, William. Fundamentals of Geophysics. Zúrich: Cambridge, 2007, p.121.

MASW, Análisis Multicanal De Ondas Superficiales, 2009, <http://masw.com/WhatisMASW.html> [Consulta: Miércoles, 2 de marzo de 2016].

NOLEN HOEKSEMA, Richard. Una introducción a las reflexiones sísmicas. Oilfield Review. Vol. 26, no1, pág. 60-61.

Norma ASTM D5777 Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation, Pág. 5.

Plan de Ordenamiento territorial de Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

ROSALES CLIMENT, Cristina Isabel. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia, Trabajo de grado. Universidad del Valle. 2001, p.23-107.

SARRIA, Alberto. Métodos geofísicos con aplicaciones en la ingeniería civil. Bogotá: Uniandes, 1948, Pag.107-172.

SISMOCLUB, Ondas De Cuerpo P y S, 2011 <http://sismoclub2011-1.wikispaces.com/Ondas+de+Cuerpo> [Consulta: Jueves, 3 de marzo de 2016].

SLIDESHARE, Adquisición Sísmica de Reflexión, 2013, <http://es.slideshare.net/diegillo13/adquisicin-ssmica-de-reflexin> [Consulta: Jueves, 3 de marzo de 2016].

SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA SISMICA, Tipos De Ondas, Ondas De Cuerpo, <http://www.smis.org.mx/htm/sismos.htm> [Consulta: Jueves, 3 de marzo de 2016].

SurfSeis MASW Software, Introduction to MASW Acquisition and Processing, 2014, <http://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/masw.html> [Consulta: Lunes, 11 de abril de 2016]

VARGAS F. Romar A. Generación de un modelo de velocidad 3d de ondas de corte (vs), integrando métodos geofísicos someros en un bloque del campo Junín, faja petrolífera del Orinoco. Caracas, Venezuela. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. 2011, pág.18.

*CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO MEDIANTE LAS
TÉCNICAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA, REFLEXIÓN SÍSMICA, MASW Y
REMI EN DEPÓSITOS SUPERFICIALES Y ZONAS CRÍTICAS DE LA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA.*

ANEXOS.

ANEXOS

ANEXO 1. EVIDENCIA DE LA TOMA DE DATOS REALIZADA EN CAMPO.

En las siguientes figuras se plasma la evidencia de la toma de datos en campo.

Figura 95. Evidencia toma de datos para la zona 1.



Fuente: Autores.

Figura 96. Evidencia toma de datos para la zona 2.



Fuente: Autores.

Figura 97. Evidencia toma de datos para la zona 3.



Fuente: Autores.

Figura 98. Evidencia toma de datos para la zona 4.



Fuente: Autores.

Figura 99. Evidencia toma de datos para la zona 5.



Fuente: Autores.

Figura 100. Evidencia 1.



Fuente: Autores.

Figura 101. Evidencia 2.



Fuente: Autores.

Figura 102. Evidencia 3.



Fuente: Autores.

Figura 103. Evidencia 4.

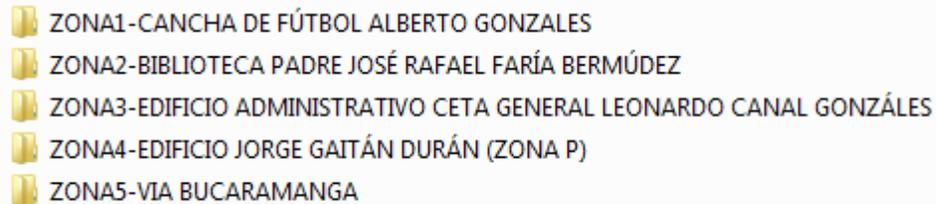


Fuente: Autores.

ANEXO 2: DATOS DEL PROCESAMIENTO DE LAS ZONAS DE ESTUDIO.

Los datos tomados en campo se adjuntan en una carpeta llamada datos y procesamiento de las zonas de estudio, donde se encuentran especificadas cada una de las zonas de la siguiente manera (ver figura 104):

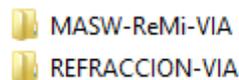
Figura 104. Esquema localización de las carpetas por zona.



Fuente: autores.

Cada una de estas carpetas contiene los archivos que hacen referencia a cada uno de los métodos desarrollados en esa zona, a modo de ejemplo se visualiza el contenido de la zona 5, (ver figura 105).

Figura 105. Métodos realizados en la zona 5.



Fuente: autores.

Para el método de refracción la carpeta contiene el esquema que se aprecia en la figura 106.

Figura 106: Esquema de ubicación de las carpetas según el tipo de datos.



Fuente: autores.

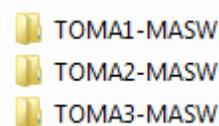
Donde cada una de estas carpetas contiene los siguientes archivos:

- DATO-ELEVACION: se encuentran las respectivas cotas de la ubicación de cada geófono respecto al nivel del mar.

- DATOS: archivos para visualizar los datos guardados de procesamiento.
- DATOS-CRUDOS: son los datos tomados en campo antes de realizarle algún procesamiento.
- FIGURAS: se encuentran todas las figuras de la zona según el método.
- PICADO-TIEMPOS: contiene los picados de tiempo de cada uno de los datos apilando la información, es decir el último picado contiene todos los picados anteriores.

Para el método de MASW el esquema de los datos es el siguiente (ver figura 107).

Figura 107. MASW por zona.



Fuente: autores.

En cada una de las carpetas que se observan en el esquema anterior se ubican los archivos para cada toma. (Ver figura 108).

Figura 108. Esquema por toma.



Fuente: autores.

- ARCHIVO: datos guardados ya procesados.
- DATOS-CRUDOS: datos tomados en campo.
- FIGURAS-SHOT 1, FIGURAS-SHOT 2 y FIGURAS-SHOT 3: imágenes de los datos adquiridos.



En la zona 5 Vía Bucaramanga para el método ReMi que solo se realizó en conjunto con el método MASW los datos se encuentran en la respectiva carpeta (ver figura 109).

Figura 109. Datos MASW-ReMi.

-  ARCHIVOS
-  DATO-CRUDO
-  FIGURAS

Fuente: autores.