

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FISICA



**ESTUDIO DE PARÁMETROS ELÁSTICOS Y GEOTÉCNICOS EN LA
TRANSECTA GUARENAS-GUATIRE MEDIANTE MÉTODOS SÍSMICOS**

**Trabajo Especial de Grado presentado ante la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
para optar por el título de licenciado en Física**

Tutor Académico: Dra. Laura Piñero
Tutor Industrial: MSc. Aldo Cataldi
Autor: Br. Jorge Pumar

CARACAS, OCTUBRE 2010

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar gracias a mi **Mamá** por llevarme de la mano toda mi vida, apoyarme, darme la motivación, la fuerza, y mucho más. Aunque ya no estés conmigo quiero dedicarte este logro tan especial y tan importante. Esto es gracias a ti..... ¡A tu fuerza! lo más importante que aprendí de ti es que nunca hay que rendirse ni decir que no. No hay palabras para decirte lo importante que fuiste y eres para mi... Te Amo.

A mis hermanos Dario, Jessica y Ray, por estar a mi lado en cada momento... son parte de mi vida y espero que esto les haga sentirse orgullosos de mí... Ahora vendrán cosas mejores para nosotros... y siempre juntos!

A Ana Alicia, gracias por estar a mi lado en los momentos más duros de mi vida, por ser incondicional y especial conmigo siempre...Te Quiero

A Ventura por ser un gran Padre, eres mi ejemplo a seguir y ojala algún día llegue a ser tan bueno como tu como Padre como Persona y como Profesional, en este mundo hay pocos como tu....

A Aldo Cataldi por darme una gran oportunidad, eres un maestro, nunca das nada por imposible, gracias por tus consejos y regaños que siempre llenan de fuerza para seguir aprendiendo y mejorar cada día más.

A Héctor Rojas por ayudarme en todo momento, te admiro porque eres un guerrero...gracias Héctor...y a todo TRX: Edward, Franco, Liliana y Dayana gracias a ustedes por brindarme su apoyo más que compañeros de trabajo son mis amigos...

RESUMEN

En el presente trabajo se llevaron a cabo tendidos de Refracción por Microtremores y estudios de pozo mediante el método DownHole, con la finalidad de obtener cantidades físicas como son, las velocidades de propagación de ondas de corte (V_s) y de ondas compresionales (V_p), ubicados en lo que serán las cuatro estaciones del transporte colectivo Metro Guarenas-Guatire, necesarias para la caracterización de sitio y útiles para determinar los parámetros Elásticos y Geotécnicos, aunque de manera muy local. La aplicación del método de sismica pasiva ReMi (Refracción por Microtremores) que tienen como fuente principal de la señal el ruido sísmico ambiental y cultural (Microtremores), apoyados en impactos de mandarría para mejorar las señales de altas frecuencias, tiene como objetivo fundamental, estudiar la propagación de las ondas de corte (V_s) para evaluar de forma representativa y eficaz las propiedades dinámicas del subsuelo, entre ellas se encuentran la rigidez, capacidad de carga permisible, etc. Los modelos sismo estratigráficos de una dimensión (1D) de velocidades (S y P) obtenidos con ambos métodos permitieron determinar dichos parámetros (elásticos y geotécnicos), así como estudiar las características asociadas a las diferentes edades geológicas presentes a lo largo de la ruta que va de Guarenas a Guatire, y las transiciones laterales, dando como resultado, cambios en los valores de rigidez y V_{s30} (velocidad equivalente a los 30 metros). En la adquisición de datos sísmicos obtenidos con el método de pozo DownHole permitió evaluar tanto el potencial como la aplicabilidad del método en áreas urbanas. En esta evaluación se evidenciaron algunas limitaciones relacionadas principalmente al ruido sísmico presente (distorsión en la llegada de la Onda de compresion y de cizalla). Por otro lado los datos obtenidos con el método de Refracción por Microtremores resultaron ser apropiados para esta zona en cuanto a la definición de perfiles de onda de corte. Los valores y perfiles de velocidad obtenidos así como los valores de coeficiente de Poisson y Módulo de Rigidez especialmente, se encuentran en el rango que corresponde a secuencias sedimentarias aluviales del Holoceno para las Estaciones Guarenas 1 y 2, que concuerda muy bien con la geología presente, para las estaciones Guatire 1 y 2 estos valores salen por encima del rango de

secuencias aluviales, y posiblemente sean valores que correspondan a sedimentos del Pleistoceno. Los valores de Vs30 para la zona del Holoceno concuerdan con otros estudios realizados para una geología con propiedades similares, en la zona del Pleistoceno los valores de Vs30 permiten interpretar un suelo más duro y más compactado.

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	VIII
INDICE DE TABLAS.....	XIII
INTRODUCCION.....	16
OBJETIVOS.....	18
<i>OBJETIVO GENERAL</i>	<i>18</i>
<i>OBJETIVOS ESPECIFICOS</i>	<i>18</i>
ANTECEDENTES	19
<i>ESTUDIOS GEOFISICOS REALIZADOS EN GUARENAS-GUATIRE.....</i>	<i>19</i>
<i>Estúdios de Ondas Superficiales e importancia de la onda de corte</i>	<i>20</i>
CAPITULO II.....	24
UBICACIÓN GEOGRAFICA Y MARCO GEOLOGICO	24
<i>Ubicación geográfica de la zona de estudio.....</i>	<i>24</i>
<i>Geología del área de estudio</i>	<i>25</i>
<i>Geología del área de estudio</i>	<i>26</i>
CAPITULO III.....	28
MARCO TEORICO	28
<i>Teoría de Ondas</i>	<i>28</i>
<i>Transformada de Fourier.....</i>	<i>30</i>
PROPIEDADES DE LAS ONDAS MECÁNICAS (REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN)	31
<i>Reflexión de ondas mecánicas</i>	<i>31</i>
<i>Refracción de ondas mecánicas.....</i>	<i>33</i>
ONDAS SÍSMICAS.....	35
ONDAS DE CUERPO.....	35
<i>Ondas tipo P</i>	<i>35</i>
<i>Ondas tipo S</i>	<i>35</i>
ONDAS SUPERFICIALES	36
<i>Ondas Rayleigh.....</i>	<i>36</i>

<i>Dispersión de la onda Rayleigh</i>	37
<i>Ondas Love</i>	37
MICROTREMORES.....	38
PARÁMETROS ELÁSTICOS Y GEOTÉCNICOS.	40
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS	43
CAPACIDAD DE CARGA PERMISIBLE	44
CARACTERIZACIÓN DE SUELOS.....	45
CAPITULO IV	48
METODOS APLICADOS	48
<i>Método de Refracción por Microtremores (ReMi)</i>	48
ANÁLISIS ESPECTRAL DE VELOCIDAD (P-F)	48
SELECCIÓN DE LA CURVA DE DISPERSIÓN DE LAS ONDAS RAYLEIGH	52
MODELADO DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA DE CORTE	53
<i>Método de pozo DownHole (DH)</i>	55
CAPITULO V	59
INSTRUMENTOS Y ADQUISICION	59
<i>Refracción por Microtremores (ReMi)</i>	59
<i>Método DownHole (DH)</i>	62
ADQUISICION	64
<i>Método DownHole (DH)</i>	64
CAPITULO IV	67
PROCESAMIENTO	67
<i>Refracción por Microtremores (ReMi)</i>	67
<i>Cálculo de la Rigidez G a partir de los valores de Vs obtenidos con el método ReMi</i>	71
MÉTODO DOWNHOLE (DH).....	71
CÁLCULO DE VELOCIDADES VS Y VP Y PARÁMETROS ELÁSTICOS.....	72
CAPITULO VII	74
RESULTADOS Y ANALISIS	74

<i>Estación Guarenas 1</i>	74
<i>Estación Guarenas 2</i>	79
<i>Estación Guatire 1</i>	82
<i>Estación Guatire 2</i>	86
PARÁMETROS DINÁMICOS Y ESTÁTICOS	91
<i>Estación Guarenas 1</i>	92
<i>Estación Guarenas 2</i>	100
<i>Estación Guatire 1</i>	108
<i>Estación Guatire 2</i>	116
Vs30, PROFUNDIDAD Vs=500M/S Y CLASIFICACIÓN DE SITIO (SUELO)	125
<i>Estación Guarenas 1</i>	126
<i>Estación Guarenas 2</i>	128
<i>Estación Guatire 1</i>	130
<i>Estación Guatire 2</i>	132
CONCLUSIONES	135
RECOMENDACIONES	137
REFERENCIAS	138

INDICE DE FIGURAS

FIGURA I-1. ESQUEMA DEL MÉTODO SASW	21
FIGURA I-2. ESQUEMA DE ADQUISICIÓN DEL MÉTODO MASW	22
FIGURA II-1. MAPA DE UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES EN LA TRANSECTA GUARENAS- GUATIRE	24
FIGURA II-2. MAPA GEOLÓGICO DE GUARENAS-GUATIRE	25
FIGURA III-1. LONGITUD DE ONDA	29
FIGURA III-2. VELOCIDAD DE FASE Y VELOCIDAD DE GRUPO	30
FIGURA III-3. REFLEXIÓN DE UNA ONDA MECÁNICA	32
FIGURA III-4. REFRACCIÓN DE UNA ONDA MECÁNICA A TRAVÉS DE 2 MEDIOS	33
FIGURA III-5. REFRACCIÓN SÍSMICA Y ÁNGULO CRÍTICO DE INCIDENCIA MODIFICADO.....	34
FIGURA III-6. ONDAS P	35
FIGURA III-7. ONDAS S	36
FIGURA III-8. ONDAS RAYLEIGH	36
FIGURA III-9. COMPORTAMIENTO DISPERSIVO DE LA ONDA RAYLEIGH	37
FIGURA III-10. ONDAS LOVE	38
FIGURA III-11. FUENTE DE MICROTREMORES	39
FIGURA III-12. MÓDULO DE VOLUMEN O DE BULK	41
FIGURA III-13. MÓDULO DE CIZALLA O DE CORTE	41
FIGURA III-14. MÓDULO DE YOUNG	42
FIGURA III-15. RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE CORTE (G) Y LA DEFORMACIÓN ANGULAR (γ)	43
FIGURA IV-1. CURVA DE DISPERSIÓN CARACTERÍSTICA DE LA ONDA RAYLEIGH.....	52
FIGURA IV-2. MODELO DE ONDA DE CORTE	54
FIGURA IV-3. A) ESQUEMA DE MÉTODO DOWNHOLE. B) FUENTE DE ENERGÍA PARA GENERAR ONDAS S Y P	55
FIGURA IV-4. IDENTIFICACIÓN DE LAS LLEGADAS EN EL SISMOGRAMA	56
FIGURA IV-5. PARÁMETROS PARA LA OBTENCIÓN DE TIEMPOS CORREGIDOS	57
FIGURA IV-6. GRAFICO DE PROFUNDIDAD VS TIEMPOS DE LLEGADA CORREGIDOS.....	58
FIGURA V-1. SISMÓGRAFO SEISMIC SOURCE-DAQ LINK III	59

FIGURA V-2. GEÓFONO DE 4.5 HZ	60
FIGURA V-3. COMPUTADOR DE CAMPO	60
FIGURA V-4. SEGMENTO DEL TENDIDO DE ADQUISICIÓN REMi (ESTACIÓN GUARENAS 1).	62
FIGURA V-5. GEÓFONO TRIAXIAL DH: PASI DHTG-50.....	62
FIGURA V-6. FUENTE DE ONDAS S.....	63
FIGURA V-7. FUENTE DE ONDAS S Y ONDAS P.....	64
FIGURA V-8. IMPACTOS DE MANDARRIA PARA GENERAR ONDAS P	65
FIGURA V-9. IMPACTOS CON EL BALANCÍN PARA GENERAR ONDAS S.....	65
FIGURA VI-1. CURVA DE DISPERSIÓN DE LA ONDA RAYLEIGH	69
FIGURA VI-2. MODELO GEOLÓGICO GENERADO A PARTIR DE LA CURVA DE DISPERSIÓN..	70
FIGURA VI-3. DROMOCRONA Y DEFINICIÓN DE LA ESTRATIFICACIÓN SÍSMICA.	73
FIGURA VII-1. DH ESTACIÓN GUARENAS-1. MODELO SISMO - ESTRATIGRÁFICO INTERPRETADO CON VALORES PROMEDIO DE VELOCIDAD PARA CADA UNIDAD SÍSMICA.	75
FIGURA VII-2. ESTACIÓN GUARENAS 1. MODELO SISMO - ESTRATIGRÁFICO, INTERPRETADO CON VALORES DE VELOCIDAD PARA CADA UNIDAD SÍSMICA.....	76
FIGURA VII-3. ESTACIÓN GUARENAS 1. CORRELACIÓN ENTRE VELOCIDADES OBTENIDAS CON DH Y REMi.	78
FIGURA VII-4. DH ESTACIÓN GUARENAS 2. MODELO SISMO - ESTRATIGRÁFICO INTERPRETADO CON VALORES PROMEDIO DE VELOCIDAD PARA CADA UNIDAD SÍSMICA	79
FIGURA VII-5. REMi ESTACIÓN GUARENAS 2. MODELO SISMO - ESTRATIGRÁFICO, INTERPRETADO CON VALORES DE VELOCIDAD PARA CADA UNIDAD SÍSMICA.....	80
FIGURA VII-6. ESTACIÓN GUARENAS 2. CORRELACIÓN ENTRE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS CON DH Y REMi.	82
FIGURA VII-7. DH ESTACIÓN GUATIRE-1. MODELO SISMO - ESTRATIGRÁFICO INTERPRETADO CON VALORES PROMEDIO DE VELOCIDAD PARA CADA UNIDAD SÍSMICA.	83
FIGURA VII-8. REMi ESTACIÓN GUATIRE 1. MODELO SISMO – ESTRATIGRÁFICO, INTERPRETADO CON VALORES DE VELOCIDAD PARA CADA UNIDAD SÍSMICA.....	84

FIGURA VII-9. ESTACIÓN GUATIRE 1. CORRELACIÓN ENTRE VELOCIDADES OBTENIDAS CON DH Y REMi.	86
FIGURA VII-10. DH ESTACIÓN GUATIRE 2. MODELO SISMO - ESTRATIGRÁFICO INTERPRETADO CON VALORES PROMEDIO DE VELOCIDAD PARA CADA UNIDAD SÍSMICA.	87
FIGURA VII-11. REMi ESTACIÓN GUATIRE 2. MODELO SISMO – ESTRATIGRÁFICO, INTERPRETADO CON VALORES DE VELOCIDAD PARA CADA UNIDAD SÍSMICA.....	88
FIGURA VII-12. ESTACIÓN GUATIRE 2. CORRELACIÓN ENTRE VELOCIDADES OBTENIDAS CON DH Y REMi.	90
FIGURA VII-13. DH GUARENAS 1. PARÁMETROS ELÁSTICOS INTERVÁLICOS.....	93
FIGURA VII-14. ESTACIÓN GUARENAS 1. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 5M DE PROFUNDIDAD.	96
FIGURA VII-15. ESTACIÓN GUARENAS 1. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 7M DE PROFUNDIDAD.	97
FIGURA VII-16. ESTACIÓN GUARENAS 1. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 10M DE PROFUNDIDAD.	97
FIGURA VII-17. ESTACIÓN GUARENAS 1. MAPAS DE RIGIDEZ (G) A LOS 15M DE PROFUNDIDAD.	98
FIGURA VII-18. ESTACIÓN GUARENAS 1. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 20M DE PROFUNDIDAD.	98
FIGURA VII-19. ESTACIÓN GUARENAS 1. VARIACIÓN DE RIGIDEZ G CON LA PROFUNDIDAD.	99
FIGURA VII-20. DH GUARENAS 2. PARÁMETROS ELÁSTICOS INTERVÁLICOS.....	101
FIGURA VII-21. ESTACIÓN GUARENAS 2. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 5M DE PROFUNDIDAD.	104
FIGURA VII-22. ESTACIÓN GUARENAS 2. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 7M DE PROFUNDIDAD	104
FIGURA VII-23. ESTACIÓN GUARENAS 2. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 10M DE PROFUNDIDAD.	105
FIGURA VII-24. ESTACIÓN GUARENAS 2. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 15M DE PROFUNDIDAD	105

FIGURA VII-25. ESTACIÓN GUARENAS 2. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 20M DE PROFUNDIDAD.	106
FIGURA VII-26. ESTACIÓN GUARENAS 2. VARIACIÓN DE RIGIDEZ G CON LA PROFUNDIDAD.	107
FIGURA VII-27. DH GUATIRE 1. PARÁMETROS ELÁSTICOS INTERVÁLICOS.	109
FIGURA VII-28. ESTACIÓN GUATIRE 1. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 5M DE PROFUNDIDAD.	112
FIGURA VII-29. ESTACIÓN GUATIRE 1. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 7M DE PROFUNDIDAD.	112
FIGURA VII-30. ESTACIÓN GUATIRE 1. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 10M DE PROFUNDIDAD.	113
FIGURA VII-31. ESTACIÓN GUATIRE 1. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 15M DE PROFUNDIDAD.	113
FIGURA VII-32. ESTACIÓN GUATIRE 1. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 20M DE PROFUNDIDAD.	114
FIGURA VII-33. ESTACIÓN GUATIRE 1. VARIACIÓN DE RIGIDEZ G CON LA PROFUNDIDAD.	115
FIGURA VII-34. DH GUATIRE 2. PARÁMETROS ELÁSTICOS INTERVÁLICOS.	117
FIGURA VII-35. ESTACIÓN GUATIRE 2. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 5M DE PROFUNDIDAD.	120
FIGURA VII-36. ESTACIÓN GUATIRE 2. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 7M DE PROFUNDIDAD.	121
FIGURA VII-37. ESTACIÓN GUATIRE 2. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 10 DE PROFUNDIDAD.	121
FIGURA VII-38. ESTACIÓN GUATIRE 2. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 15 DE PROFUNDIDAD.	122
FIGURA VII-39. ESTACIÓN GUATIRE 2. MAPA DE RIGIDEZ (G) A LOS 20 DE PROFUNDIDAD.	122
FIGURA VII-40. ESTACIÓN GUATIRE 2. VARIACIÓN DE RIGIDEZ G CON LA PROFUNDIDAD.	123

FIGURA VII-41. ESTACIÓN GUARENAS 1. MAPA DE Vs30 Y CLASIFICACIÓN DE SITIO IBC- NERPH.....	126
FIGURA VII-42. ESTACIÓN GUARENAS 2. MAPA DE Vs30 Y CLASIFICACIÓN DE SITIO IBC- NERPH.....	128
FIGURA VII-43. ESTACIÓN GUATIRE 1. MAPA DE Vs30 Y CLASIFICACIÓN DE SITIO IBC- NERPH.....	130
FIGURA VII-44. ESTACIÓN GUATIRE 2. MAPA DE Vs30 Y CLASIFICACIÓN DE SITIO IBC- NERPH.....	132

INDICE DE TABLAS

TABLA II-1. COORDENADAS DE LAS CUATRO ESTACIONES DE LA TRANSECTA GUARENAS-GUATIRE.....	24
TABLA III-1. CARACTERÍSTICAS DE LOS MICROTREMORES (PACHECO, D. 2008).....	39
TABLA III-2. CAPACIDAD DE CARGA PARA LOS MATERIALES SEGÚN UNIFORM BUILDING CODE (1997), MODIFICADA.....	45
TABLA III-3. TABLA IBC (INTERNATIONAL BUILDING CODE) DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS, MODIFICADA.	46
TABLA III-4. TABLA COVENIN DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN LA Vs	47
TABLA VII-1. DH ESTACIÓN GUARENAS 1. PRUEBA DOWNHOLE, MODELO ESTRATIGRÁFICO.	75
TABLA VII-2. REMi ESTACIÓN GUARENAS 1. REFRACCIÓN POR MICRO TREMORES, MODELO ESTRATIGRÁFICO.	77
TABLA VII-3. COMPARACIÓN ENTRE VELOCIDADES OBTENIDAS CON DH Y REMi EN LA ESTACIÓN GUARENAS 1.....	77
TABLA VII-4. DH ESTACIÓN GUARENAS 2. PRUEBA DOWNHOLE, MODELO ESTRATIGRÁFICO.	80
TABLA VII-5. REMi ESTACIÓN GUARENAS 2. REFRACCIÓN POR MICRO TREMORES, MODELO ESTRATIGRÁFICO.	81
TABLA VII-6. COMPARACIÓN ENTRE VELOCIDADES OBTENIDAS CON DH Y REMi EN LA ESTACIÓN GUARENAS 2.....	81
TABLA VII-7. DH ESTACIÓN GUATIRE 1. PRUEBA DOWNHOLE, MODELO ESTRATIGRÁFICO.	83
TABLA VII-8. REMi ESTACIÓN GUATIRE 1. REFRACCIÓN POR MICRO TREMORES, MODELO ESTRATIGRÁFICO.	85
TABLA VII-9. COMPARACIÓN ENTRE VELOCIDADES OBTENIDAS CON DH Y REMi EN LA ESTACIÓN GUATIRE 1.....	85
TABLA VII-10. DH ESTACIÓN GUATIRE-2 PRUEBA DOWNHOLE, MODELO ESTRATIGRÁFICO.	88

TABLA VII-11. REMi ESTACIÓN GUATIRE 2. REFRACCIÓN POR MICRO TREMORES, MODELO ESTRATIGRÁFICO.	89
TABLA VII-12. COMPARACIÓN ENTRE VELOCIDADES OBTENIDAS CON DH Y REMi EN LA ESTACIÓN GUATIRE 2.	89
TABLA VII-13. DENSIDADES OBTENIDAS CON ESTUDIOS GEOTÉCNICOS.	91
TABLA VII-14. DH ESTACIÓN GUARENAS 1. DATOS DE LOS ESTRATOS SÍSMICOS POR CAPA. VELOCIDADES Y CONSTANTES ELÁSTICAS PROMEDIO.	92
TABLA VII-15. ESTACIÓN GUARENAS 1. VALORES DE VELOCIDAD DE ONDAS S Y P Y PARÁMETROS ELÁSTICOS INTERVÁLICOS.	94
TABLA VII-16. ESTACIÓN GUARENAS 1. VALORES DE RIGIDEZ PARA 5, 7, 10, 15 Y 20 METROS.	95
TABLA VII-17. DH ESTACIÓN GUARENAS 2. DATOS DE LOS ESTRATOS SÍSMICOS POR CAPA. VELOCIDADES Y CONSTANTES ELÁSTICAS PROMEDIO.	100
TABLA VII-18. ESTACIÓN GUARENAS 2. VALORES DE VELOCIDAD DE ONDAS S Y P Y PARÁMETROS ELÁSTICOS INTERVÁLICOS.	102
TABLA VII-19. ESTACIÓN GUARENAS 2. VALORES DE RIGIDEZ PARA 5, 7, 10, 15 Y 20 METROS.	103
TABLA VII-20. DH ESTACIÓN GUATIRE 1. DATOS DE LOS ESTRATOS SÍSMICOS POR CAPA. VELOCIDADES Y CONSTANTES ELÁSTICAS PROMEDIO.	108
TABLA VII-21. ESTACIÓN GUATIRE 1. VALORES DE VELOCIDAD DE ONDAS S Y P Y PARÁMETROS ELÁSTICOS.	110
TABLA VII-22. ESTACIÓN GUATIRE 1. VALORES DE RIGIDEZ PARA 5, 7, 10, 15 Y 20 METROS.	111
TABLA VII-23. DH ESTACIÓN GUATIRE 2. DATOS DE LOS ESTRATOS SÍSMICOS POR CAPA. VELOCIDADES Y CONSTANTES ELÁSTICAS PROMEDIO.	116
TABLA VII-24. ESTACIÓN GUATIRE 2. VALORES DE VELOCIDAD DE ONDAS S Y P Y PARÁMETROS ELÁSTICOS.	118
TABLA VII-25. ESTACIÓN GUATIRE 2. VALORES DE RIGIDEZ PARA 5, 7, 10, 15 Y 20 METROS.	119
TABLA VII-26. CAPACIDAD DE CARGA PERMISIBLE PARA FUNDACIONES SUPERFICIALES OBTENIDAS DH.	125

TABLA VII-27. ESTACIÓN GUARENAS 1. MODELOS REMI DE VS30.....	127
TABLA VII-28. ESTACIÓN GUARENAS 2. MODELOS REMI DE VS30.....	129
TABLA VII-29. ESTACIÓN GUATIRE 1. MODELOS REMI DE VS30.....	131
TABLA VII-30. ESTACIÓN GUATIRE 2. MODELOS REMI DE VS30.....	133

CAPITULO I

INTRODUCCION

Hoy en día los métodos sísmicos aplicados a la ingeniería civil y a la geotecnia, son utilizados como herramientas para el estudio de las ondas de compresión (ondas P) y de corte (ondas S), permitiendo la caracterización de diferentes tipos de suelo a partir de sus propiedades dinámicas (módulos elásticos y geotécnicos), mejorando así los parámetros necesarios para la construcción de edificaciones, prevención de riesgos asociados a diversos factores (presencia de cárcavas, licuefacción, arcillas expansivas, sismicidad) a bajo costo económico.

El estudio de la onda de corte particularmente se ha convertido en los últimos años en un elemento fundamental para la evaluación del comportamiento del suelo, especialmente enfocado al área ingeniería civil y evaluación de riesgo sísmico. En la actualidad existen métodos geofísicos no invasivos dirigidos al estudio de las ondas superficiales que permiten comprender las respuestas locales ante la propagación de las ondas sísmicas a través del subsuelo, uno de ellos es el aplicado en este trabajo llamado método de Refracción por Microtremores, y consiste en determinar la distribución de las ondas de corte a través del análisis espectral de las ondas Rayleigh, es por ello que en ambientes urbanos con altos niveles de ruido sísmico generado por la actividad humana, estos métodos resultan muy eficientes y ventajosos respecto a los métodos de prospección sísmica tradicionales.

Otro método sísmico práctico y económico para estudios de propagación de ondas s y ondas p, es el método de pozo DownHole que es capaz de detectar capas muy delgadas, tiene limitaciones tal como en la mayoría de los métodos comúnmente usados (como la refracción sísmica), la alteración de los registros

sísmicos causados por la presencia de ruido, sobre todos en medios donde la actividad humana es frecuente.

En este trabajo se realiza el estudio comparativo de las velocidades de la onda de corte determinadas con ambos métodos, así como el cálculo y análisis de los parámetros elásticos tales como coeficiente de Poisson, Modulo de Rigidez, Modulo de Young, Modulo de Bulk, etc., y geotécnicos como son Vs30, capacidad de carga permisible y Vs500 que son necesarios para la caracterización de suelos siguiendo las normas de procedimientos nacionales e internacionales como la venezolana COVENIN 1976 (2001) y la NEHRP-IBC-ASCE (USA), en las cuatro estaciones del transporte colectivo Metro Guaremas-Guatire, realizados por la compañía consultora de estudios geofísicos TRX Consulting C.A.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Caracterizar con estudios Geofísicos los Parámetros Elásticos y Geotécnicos de la transecta Guarenas – Guatire, aplicando el método de refracción de microtremores (ReMi) y el método de sísmica de pozo DownHole

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Adquisición y procesamiento de microtremores en las estaciones de la transecta Guarenas-Guatire, para extraer información sobre la distribución de las ondas de corte (V_s) en el subsuelo.
- Determinar las velocidades de ondas sísmicas (V_s y V_p) en función de la profundidad, aplicando el método DownHole.
- Obtener modelos sísmos estratigráficos 1D velocidades de ondas P y ondas S.
- Cálculo de los Parámetros Elásticos y Geotécnicos interválicos a partir de las velocidades (V_s y V_p) obtenidas por el método DownHole.
- Obtener mapas de V_s30 en las estaciones de la transecta.
- Realizar mapas de rigidez para 5, 7, 10, 15 y 20 metros de profundidad en cada estación.
- Correlacionar los resultados obtenidos, ReMi – DownHole.

ANTECEDENTES

ESTUDIOS GEOFISICOS REALIZADOS EN GUARENAS-GUATIRE

En la zona de Guarenas-Guatire se han realizado estudios geofísicos previos, entre ellos destaca el proyecto de microzonificación sísmica realizado por FUNVISIS (2008) cuyo objetivo principal fue determinar los parámetros geofísicos y geotécnicos que incrementan o reducen el movimiento del terreno ante un sismo, estos parámetros son: Vs30, periodo fundamental de vibración del suelo y el espesor de la capa sedimentaria a lo largo de la ruta que seguirá la futura línea del Metro Caracas-Guarenas-Guatire. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- “Se obtuvo valores de Vs30 de la zona central del área estudio que varían en un rango entre 560 m/s y 800 m/s, catalogados por las normas nacionales (COVENIN) e internacionales (IBC-NERHP) como “suelos duros”.
- En la zona este se tienen valores de Vs30 que varía desde 400 m/s hasta 800 m/s, catalogado por todas las normas nacionales e internacionales como “suelos duros”.

También se realizaron estudios de Gravimetría generándose un perfil de anomalías de Bouguer. En este perfil se obtuvo el siguiente resultado:

- Se determinó un espesor de sedimentos de 160 metros en el lado sureste de la cuenca de Guatire.

Finalmente la información obtenida con el método Gravimétrico fue corroborada con estudios de ruido ambiental donde se observan valores que oscilan entre 0.23 y 0.3 s. Los periodos bajos corresponden a la zona oeste del

área de estudio (Autopista Caracas-Guarenas) y los periodos altos a la zona este (cuenca de Guatire) en donde se interpretan espesores de sedimentos por encima de los 300 metros” (FUNVISIS, 2008).

Skrainka (2009), realizó estudios comparativos entre el método de Refracción por Microtremores (ReMi) con la finalidad de obtener un perfil de velocidad de ondas de corte, y estudios con pozos donde se llevaron a cabo pruebas de penetración estándar (Nspt), y utilizando valores de Vs a partir de las diferentes ecuaciones empíricas en base a la cantidad de golpes reportados en las perforaciones (SPT), a lo largo de 10 Km de la vía Guarenas-Guatire, obteniéndose variaciones de velocidad de ondas para diferentes edades geológicas presentes en la ruta.

Pimentel (2010), con estudios de ReMi realizados por TRX Consulting C.A. y vibraciones naturales a lo largo de la transecta Guarenas-Guatire, definiendo los ambientes geológicos en la zona para la realización del modelado dinámico. “El resultado principal indica que los sedimentos de edad Pleistoceno tienen menor rigidez superficial que los sedimentos de edad Holoceno presentes en la zona”.

Estudios de Ondas Superficiales e importancia de la onda de corte

En medios urbanos e industrializados, donde predomina el ruido generado por la actividad humana cotidiana, que generalmente constituye una limitante en la adquisición de sísmica tradicional (refracción o métodos de pozo), resulta una fuente de señal útil para el estudio de ondas superficiales. En sus formas activas, pasivas y mixtas estos métodos, con la evaluación espectral de las ondas Rayleigh permiten la extracción de una curva de dispersión cuya inversión calcula un modelo 1D de ondas de corte. Entre las técnicas diseñadas para el estudio de onda superficial, se encuentran el *Spectral Analysis of Surface Wave (SASW)*, y en su versión multicanal *Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW)*, y el método por Refracción por Microtremores (ReMi).

A mediados de los años 80 se comienza a usar el análisis espectral del ground roll para el método SASW, generado por una fuente impulsiva y grabado por dos receptores de baja frecuencia (1 a 4,7 Hz), variando la separación entre los receptores y la fuente de señal, se puede construir la curva de dispersión (velocidad de fase vs. Longitud de onda) y a partir de esto realizar un modelo de velocidad de onda S (V_s), en la figura I-1 se observa un esquema del método SASW.

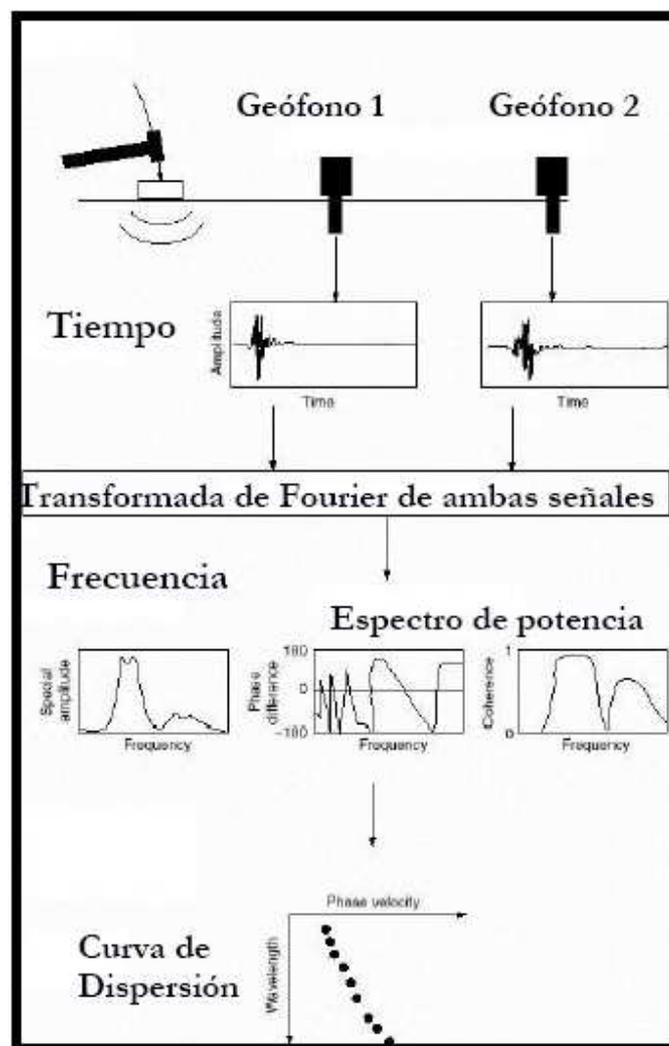


Figura I-1. Esquema del método SASW (GRANDA SANZ, 2006).

La Técnica MASW fue diseñada para optimizar el concepto del método SASW. Los registros se realizan simultáneamente con 12 o más receptores en distancias cortas entre ellos (generalmente entre 1 y 2 metros) o largas (100 ó 500 metros), la energía es generada por una fuente impulsiva o vibratoria, proporcionando una redundancia estadística para medir velocidades de fase (Linares, 2005). Los datos multicanales muestran un formato de frecuencia variable con el tiempo, además permiten la identificación y rechazo de los modos no fundamentales de ondas Rayleigh y otro ruido coherente, elementos que representan las limitaciones del SASW (Cataldi, 2008). La configuración de campo básica y la rutina de adquisición para el MASW (figura I-2) generalmente es la misma que se usa en los métodos convencionales de refracción y CMP (Punto medio común) con reflexión de ondas de cuerpo.

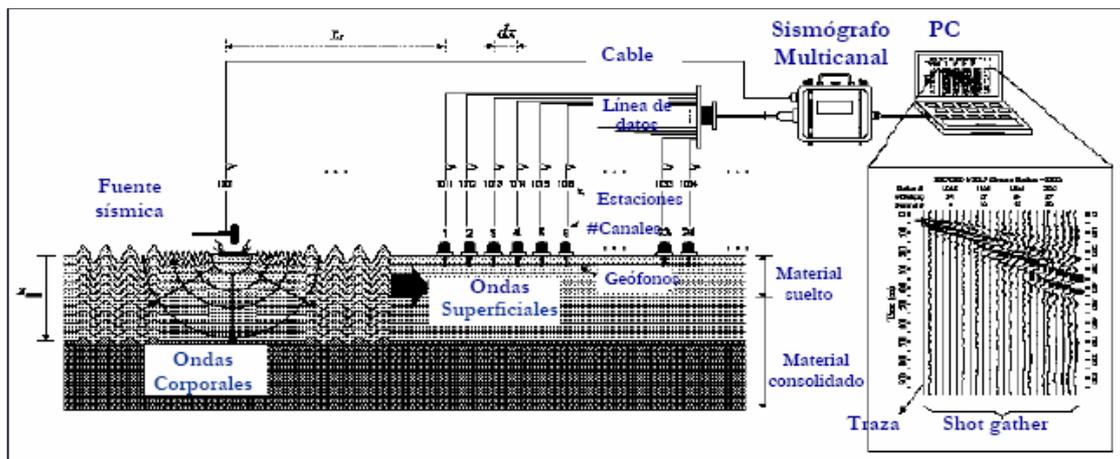


Figura I-2. Esquema de adquisición del método MASW (GRANDA SANZ, 2006).

El método **ReMi** (Refraction Microtremors), diseñado por John Louie en el año 2001, es utilizado para obtener perfiles unidimensionales de ondas de corte, sus fundamentos teóricos se basan en los métodos SASW y MASW. Es un método híbrido que utiliza como fuente de señal los microtremores (pasivo) que es proporcionada por el ruido cultural que contribuye a los valores de baja frecuencia en el espectro lentitud-frecuencia, combinada con impactos de mandrill u otra fuente mecánica (activos), que contribuyen a las altas e intermedias frecuencias

del espectro lentitud frecuencia. La metodología de adquisición se fundamenta en el mismo sistema de adquisición del método de refracción estándar. Y constituye uno de los métodos más sencillos y útiles para la determinación de perfiles de onda de corte, representa un método de bajo costo económico y perfectamente útil para medios con altos niveles de ruido. Hoy en día este método es usado comúnmente en países de gran nivel urbanístico e industrial, entre estos se pueden mencionar a Estados Unidos, España, Italia, Japón, y otros. A esta lista Venezuela se ha estado integrando los últimos años, lo que indica la efectividad del método para determinar la distribución de la onda corte y por consiguiente las propiedades dinámicas del subsuelo.

CAPITULO II

UBICACIÓN GEOGRAFICA Y MARCO GEOLOGICO

Ubicación geográfica de la zona de estudio

La zona de estudio está distribuida en cuatro estaciones en la transecta Guarenas-Guatire (figura II-1) ubicada en el estado Miranda, Venezuela, específicamente en los municipios Plaza y Zamora cuyas coordenadas se muestran en la tabla II-1, de cada estación.

GUARENAS 1		GUARENAS 2		GUATIRE1		GUATIRE 2	
X(UTM)	Y(UTM)	X(UTM)	Y(UTM)	X(UTM)	Y(UTM)	X(UTM)	Y(UTM)
761228	1158776	763063	1158529	766804	1157974	768303	1157028

Tabla II-1. Coordenadas de las cuatro estaciones de la transecta Guarenas-Guatire.

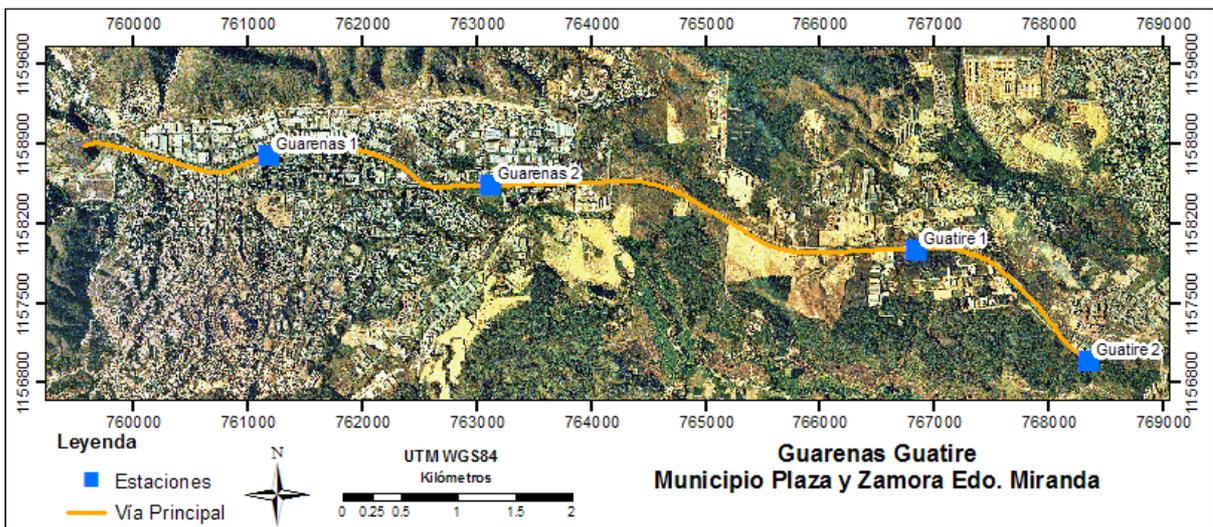


Figura II-1. Mapa de ubicación de las estaciones en la transecta Guarenas-Guatire (Google Earth) modificado.

Geología del área de estudio

Basados en la descripción realizada en el código estratigráfico de Venezuela (2009) y por González de Juana (1980), se hace una síntesis de las características generales de las unidades geológicas que afloran en la zona de estudio (figura II-2).

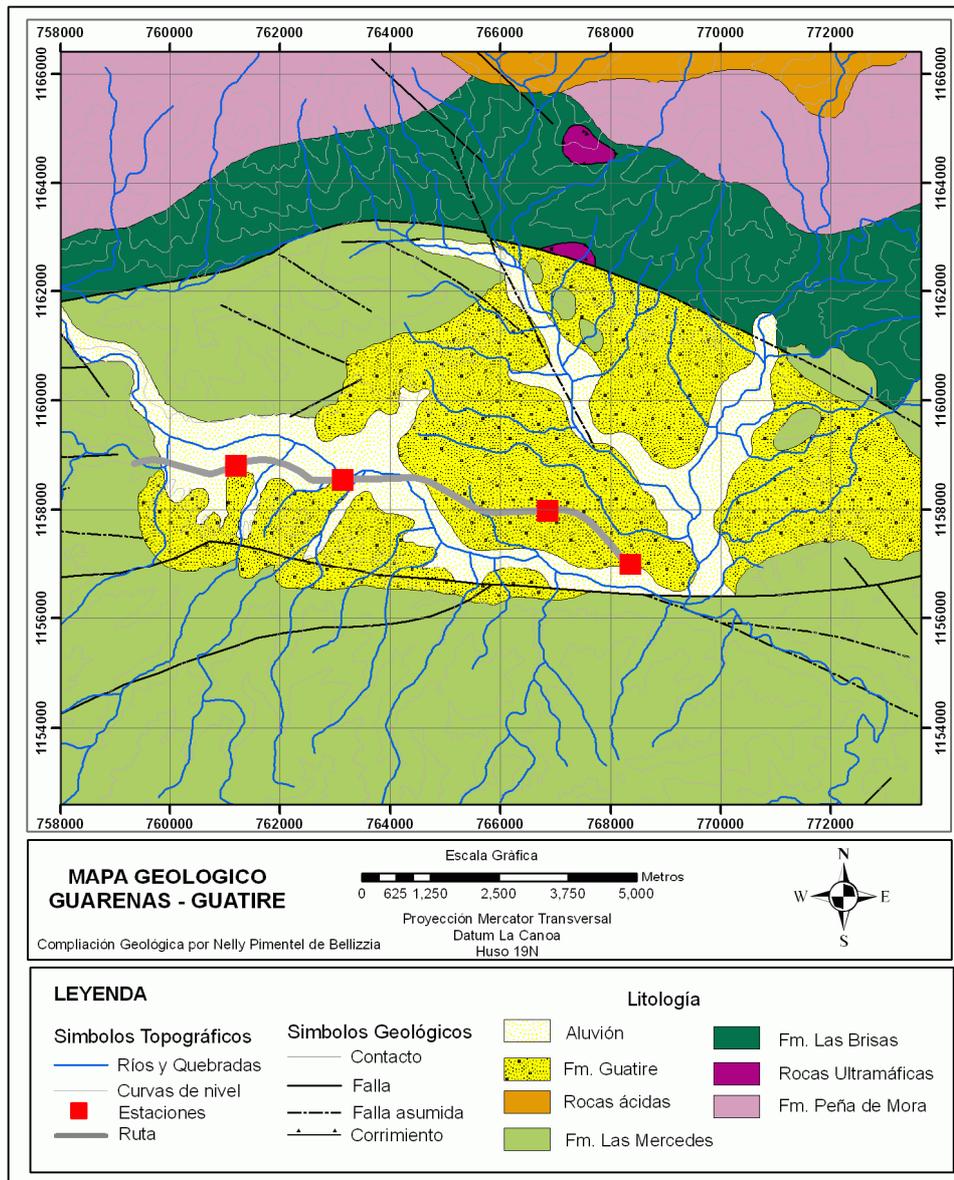


Figura II-2. Mapa Geológico de Guarenas-Guatire (TRX Consulting, 2010).

Geología del área de estudio

Formación las Mercedes mesozoico (Jurásico - Cretácico): Constituida principalmente por esquistos calcáreos, con zonas grafitosas y localmente zonas micáceas, de tonalidades de rosado a gris. Posee intercalaciones de lentes de mármol grafitoso. La roca posee buena foliación y grano fino a medio. En su base presenta metaconglomerados, esquistos cloríticos, haciéndose más cuarzosa y menos calcárea hacia el tope (González de Juana, 1980).

Urbani (2005), denomina la Formación como Esquisto de Las Mercedes, donde predominan las rocas de protolito pelítico, de color gris oscuro a negro (esquisto o filita) con grafito y de mineralogía diversa. Usualmente hay mármol interfoliado desde niveles milimétricos hasta decamétricos (Pimentel, 2009).

Formación Guatire Pleistoceno: Esta unidad está compuesta por un conglomerado basal de color rojo ladrillo, seguido de una secuencia de conglomerados mal consolidados, limos laminados, arcillas limosas y arcillas. Los conglomerados y gravas presentan capas de espesores individuales variables hasta 3 m, en paquetes de hasta 50 metros; todos éstos presentan cierto grado de oxidación por meteorización. Las arcillas de la Formación Guatire constituyen el 40% del volumen total y las calizas presentes en esta formación se ubican suroeste de la cuenca. Se observan también capas de gravas y conglomerados que pasan progresivamente a arenas, limos laminados y arcillas. Se encuentra en contacto discordante sobre las rocas de la Formación Las Mercedes. González de Juana (1980) explica que la Formación Guatire se encuentra discordante con las rocas metamórficas, en un graben asimétrico limitado por fallas de dirección este-oeste, en forma similar al valle de Caracas, y su edad geológica es Pleistoceno superior, aunque los fósiles que encontraron no son diagnósticos.

Depósito Cuaternario Aluvial del Holoceno: los aluviones del Holoceno son representados por arenas de grano fino a grueso, limosa y abundantes fragmentos

sub-angulares a angulares de cuarzo, calcita, mármol y esquisto, con algunos lentes de limo arenoso (TRX Consulting C.A, 2009).

CAPITULO III

MARCO TEORICO

Este capítulo contempla una descripción teórica de los métodos utilizados en este trabajo. Realizando en primer lugar algunas definiciones sobre la teoría de ondas mecánicas, seguidamente se hace referencia a las propiedades de las ondas (Reflexión y Refracción sísmica), tipos de ondas sísmicas (ondas de cuerpo y ondas superficiales), el estudio de la dispersión de la onda superficial Raleigh que es un elemento fundamental en esta investigación, así como los microtemores. Finalmente se explican los métodos geofísicos utilizados, específicamente métodos sísmicos, que son: Método de Refracción por Microtemores (ReMi) y método de pozo DownHole (DH).

Teoría de Ondas

Uno de los movimientos más importantes observados en la naturaleza es el movimiento oscilatorio (o vibratorio). Una partícula oscila cuando se mueve periódicamente con respecto a la posición de equilibrio.

- **Frecuencia de onda.**

La frecuencia f de una onda es igual al número de ciclos de movimiento que tienen lugar por segundo (ecuación III-1).

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{ec. III-1})$$

donde ω es la frecuencia angular.

- **Período de una onda**

El Período T del movimiento es el tiempo en el que se efectúa un ciclo completo (ecuación III-2).

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ o bien, } T = \frac{1}{f} \quad (\text{ec. III-2})$$

- **Longitud de Onda**

La longitud de onda λ es igual a la distancia entre los dos puntos más próximos del medio donde la diferencia de fase de las oscilaciones es igual a 2π (figura III-1).

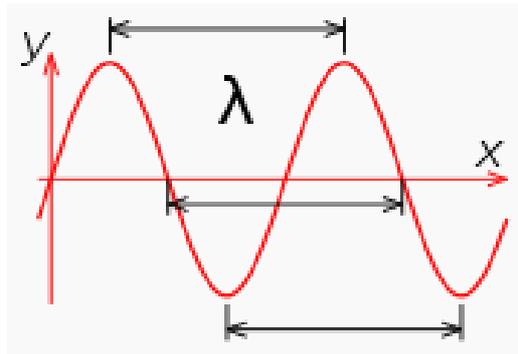


Figura III-1. Longitud de onda.

- **Velocidad de fase**

Se llama velocidad de fase V_f , a aquella con la cual se propagan las oscilaciones de una onda armónica individual, es decir, la velocidad de sus frentes de onda (ecuación III-3), como se observa en la figura III-2:

$$V_f = \frac{\omega}{k} \quad (\text{ec. III-3})$$

▪ Velocidad de Grupo

La ecuación III-4 representa el movimiento ondulatorio de amplitud modulada. Como se observa en la figura III-2 la modulación de amplitud corresponde en si a un movimiento que se propaga con una velocidad llamada velocidad de grupo (ecuación III-5).

$$\Psi = 2\psi_0 \cos \frac{1}{2} [(k' - k)x - (\omega' - \omega)t] \quad (\text{ec. III-4})$$

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{ec. III-5})$$

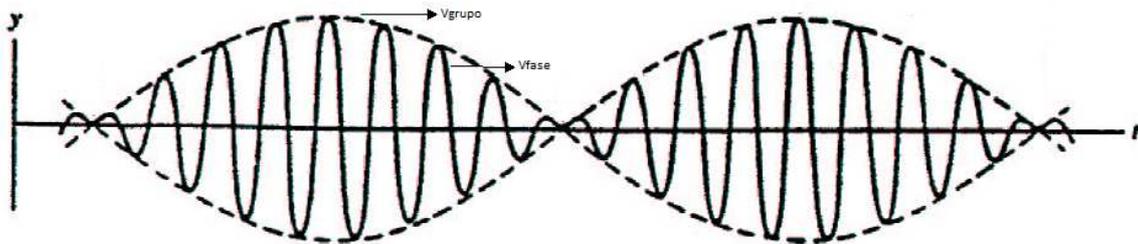


Figura III-2. Velocidad de fase y Velocidad de Grupo
(<http://bacterio.uc3m.es/docencia/laboratorio/guiones/mecanica/velocidaddefase.pdf>).

Transformada de Fourier

La transformación de Fourier consiste en una generalización que permite efectuar la descomposición espectral de señales no periódicas de energía finita. El análisis de Fourier de las señales de este tipo (o serie de tiempo) obliga a pensar en la frecuencia como una nueva variable continua.

Se tiene la siguiente ecuación:

Transformada de Fourier.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (\text{ec. III-6})$$

- t : tiempo.

- f : frecuencia.
- $x(t)$: señal de prueba.
- $e^{-i2\pi ft}$: Fasor de sondeo (Kernel Function).
- $X(f)$: Espectro en función de la frecuencia.

$x(t) \leftrightarrow X(f)$, es decir, para una función $x(t)$ existe un equivalente $X(f)$.

La transformada de Fourier actúa como un detector de energía en frecuencia-dependiente.

Propiedades de las ondas mecánicas (Reflexión y Refracción)

Reflexión de ondas mecánicas

La reflexión de una Onda ocurre cuando ésta incide en una interface con propiedades distintas como son la densidad y la velocidad del medio. Aunque el otro medio absorba parte de la energía recibida, se produce también reflexión en la que se transmite de vuelta parte de la energía incidente, la energía total de la onda transmitida y reflejada es igual a la energía de la onda incidente. Las proporciones de la energía transmitida y reflejada está determinada por el contraste de impedancia acústica Z .

$$Z = \rho \times v \quad (\text{ec. III-7})$$

donde ρ es la densidad del medio y v es la velocidad de la onda en el medio.

En la figura III-3 se representa un frente de ondas plano que se propaga en un medio y choca con una superficie horizontal con un cierto ángulo i de incidencia (se mide con respecto a la dirección normal N). De acuerdo con el principio de Huygens (todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las

direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden), cuando el frente de ondas empieza a "tocar" la superficie, el punto A se convierte en un nuevo foco que emite ondas secundarias y según transcurre el tiempo y el frente AB va incidiendo, repiten este comportamiento todos los puntos de la superficie comprendidos entre A y C. El frente de ondas reflejado, DC, es el envolvente de las ondas secundarias que se han ido emitiendo durante un tiempo igual al periodo desde el tramo AC de la pared.

De los triángulos ABC y ADC se tiene la primera Ley de Reflexión.

$$i = r$$

Donde i es el ángulo incidente y r es el ángulo reflejado por el nuevo frente de ondas.

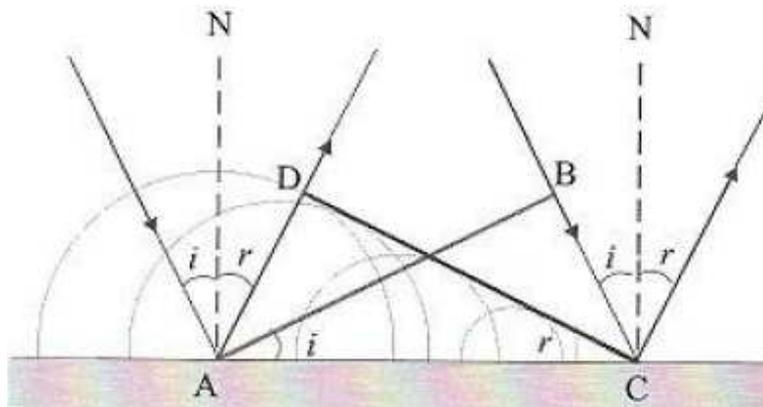


Figura III-3. Reflexión de una onda mecánica
 (<http://intercentros.cult.gva.es/iesleonardodavinci/fisica/Ondas/Ondas09.htm>).

Refracción de ondas mecánicas

La refracción de una onda consiste en el cambio de dirección que experimenta una onda cuando pasa de un medio a otro con propiedades físicas distintas. Este cambio de dirección se produce como consecuencia de la diferente velocidad de propagación que tiene la onda en ambos medios.

En la figura III-4, se representa la refracción de una onda plana desde un medio 1 a otro medio 2, suponiendo que la velocidad de propagación es menor en el segundo medio que en el primero. A medida que el frente de ondas AB va incidiendo en la superficie de separación, los puntos AC de esa superficie se convierten en focos secundarios y transmiten la vibración hacia el segundo medio. Debido a que la velocidad en el segundo medio es menor, la envolvente de las ondas secundarias transmitidas conforma un frente de ondas EC, en el que el punto E está más próximo a la superficie de separación que el B. En consecuencia, al pasar al segundo medio los rayos se desvían acercándose a la dirección normal N.

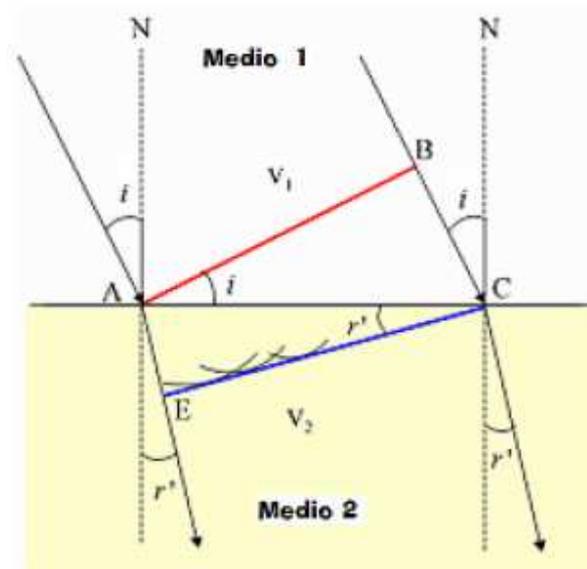


Figura III-4. Refracción de una onda mecánica a través de 2 medios (<http://intercentres.cult.gva.es/iesleonardodavinci/fisica/Ondas/Ondas09.htm>).

La Ley fundamental que describe la refracción de los rayos sísmicos es la expresión conocida como la **Ley de Snell** (ec. III-8). La refracción sísmica ocurre cuando se tiene la condición de ángulo crítico (figura III-5)

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2} \quad (\text{ec. III-8})$$

donde i y r son los ángulos de incidencia y refractados respectivamente, V_1 y V_2 son las velocidades en el medio 1 y en el medio 2. El fenómeno de refracción sísmica viene dado en la condición de Angulo incidente crítico (Figura III-5).

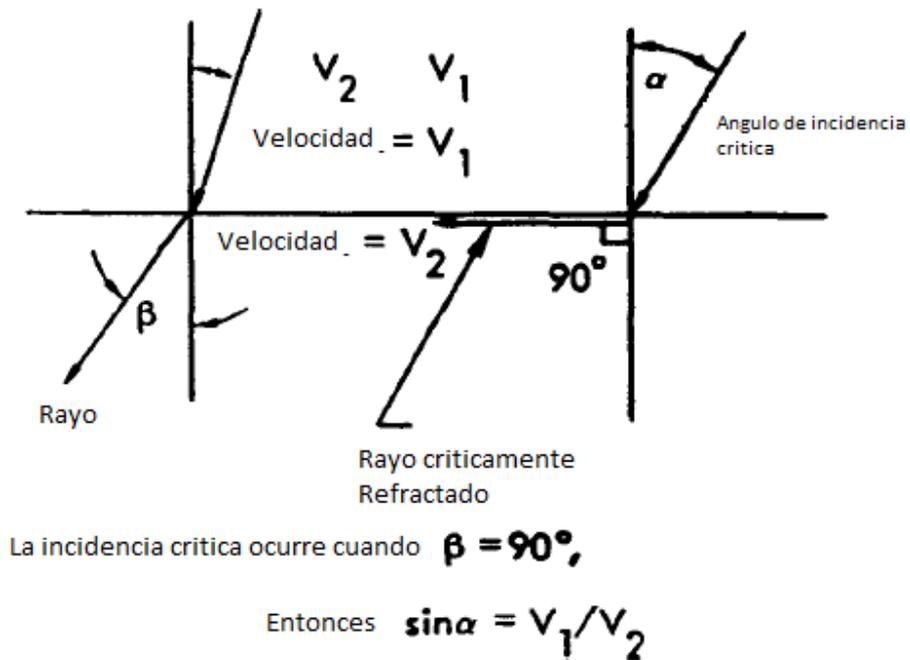


Figura III-5. Refracción Sísmica y ángulo crítico de incidencia (Redpath, 1973) modificado.

Ondas Sísmicas

Las Ondas sísmicas, con ondas elásticas que se propagan a través de la tierra, y estas a su vez se clasifican en dos clases de ondas: las ondas de cuerpo y las ondas superficiales.

Ondas de Cuerpo

Ondas tipo P

Llamadas también Ondas de compresión o primarias, las ondas P oscilan en la misma dirección en la que se propaga. Estas ondas se mueven a través de un medio con mayor velocidad que cualquier otra, el comportamiento de la partícula en la onda p es de compresión y dilatación como se muestra en la figura III-6.

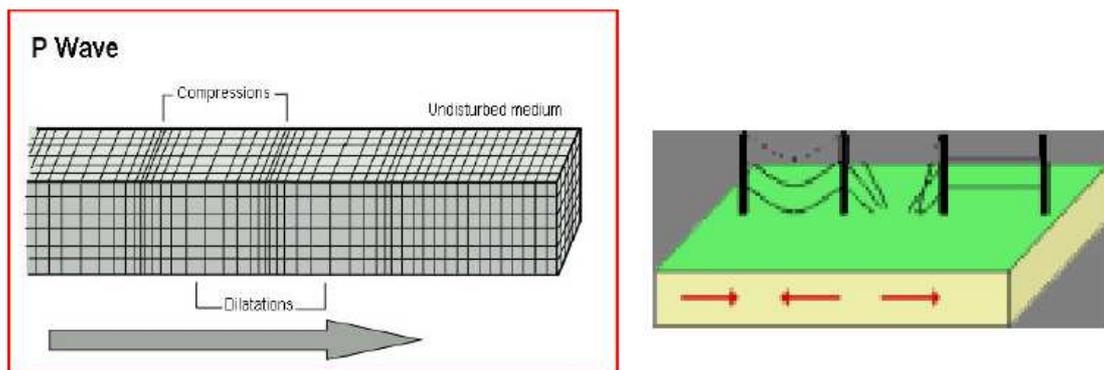


Figura III-6. Ondas P (Cees van Westen, 2005).

Ondas tipo S

Llamadas secundarias, de corte o de cizalla, el movimiento de partículas de las ondas S oscilan perpendicularmente a la dirección en que se propaga la onda, tienen menor velocidad que la onda P con un valor aproximado de $0.58V_p$ (velocidad de onda p). Usualmente la onda s tiene mayor amplitud que la onda P y se siente más fuerte que ésta. La onda S no se propaga en medios líquidos ya que éstos no soportan esfuerzos de corte (figura III-7).

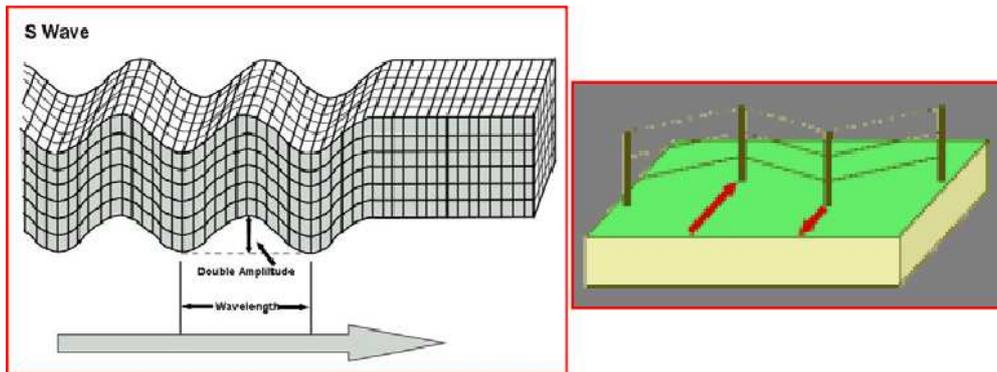


Figura III-7. Ondas S (Cees van Westen, 2005).

Ondas Superficiales

Estas ondas se propagan por la superficie de la tierra, se desplazan a menor velocidad que las ondas S y P. Las ondas superficiales como en las ondas P se clasifican en dos: Ondas Rayleigh y Ondas Love.

Ondas Rayleigh

Las Ondas Rayleigh producen un movimiento elíptico retrogrado de suelo. El movimiento es análogo al producido en las ondas del mar, las ondas S decrecen exponencialmente con la profundidad, La velocidad de las ondas Rayleigh (v_{Rayleigh}) es menor que la velocidad de las ondas S y es aproximadamente $v_{\text{Rayleigh}} = 0,9 \times v_s$ figura III-8.

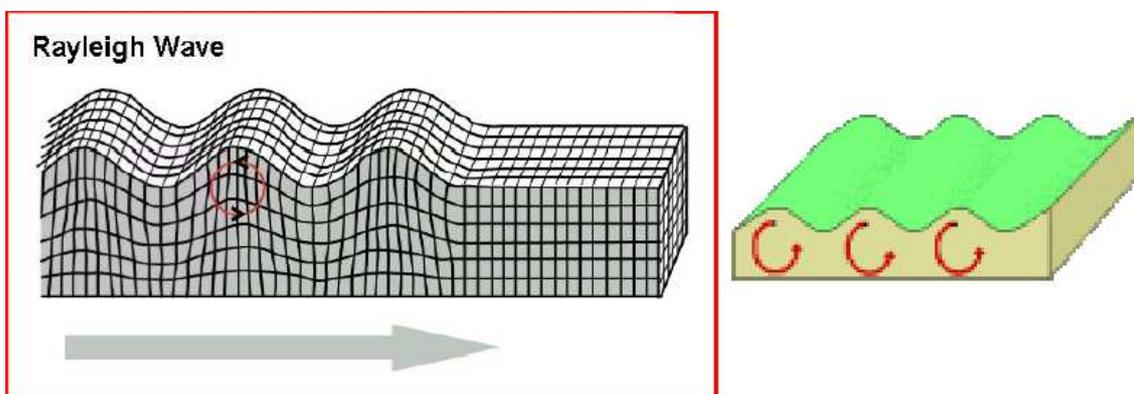


Figura III-8. Ondas Rayleigh (Cees van Westen, 2005).

Dispersión de la onda Rayleigh

Se define como dispersión el cambio de velocidad de propagación de las ondas Rayleigh (V_R), en función de la longitud de onda (λ) o de la frecuencia (f) (Granda, A.)

Este fenómeno se manifiesta cuando el medio no es homogéneo en términos de la distribución de los valores de V_s , según la vertical. En un medio con valores de V_s creciente con la profundidad las componentes de altas frecuencias (menor longitud de onda) se transmiten a menor velocidad de fase (V_R) que las de bajas frecuencias (mayor longitud de onda) además profundizan más el terreno (Granda, A., 2006) en la figura III-9 se observa un esquema de la dispersión de una onda.

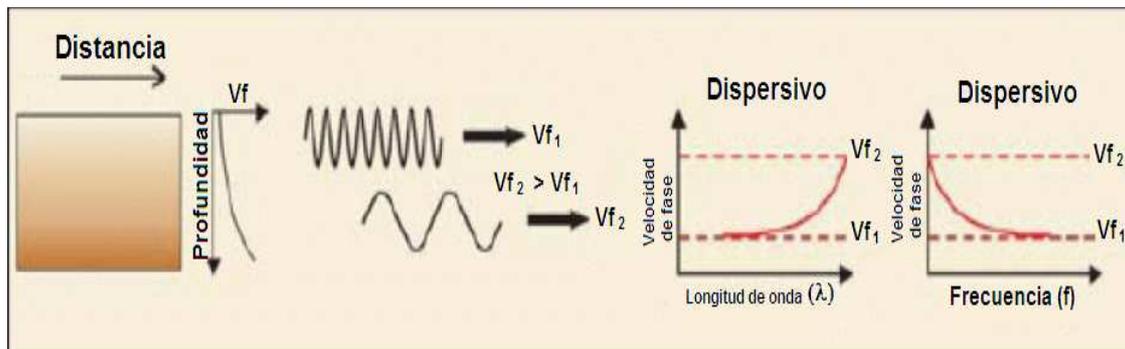


Figura III-9. Comportamiento dispersivo de la Onda Rayleigh (GRANDA SANZ, 2006) modificado.

Ondas Love

Las Ondas Love se generan en medios elásticos estratificados y oscilan perpendicularmente a su propagación como lo hacen las ondas S, la diferencia es que las ondas Love están polarizadas al plano horizontal de la tierra (figura III-10).

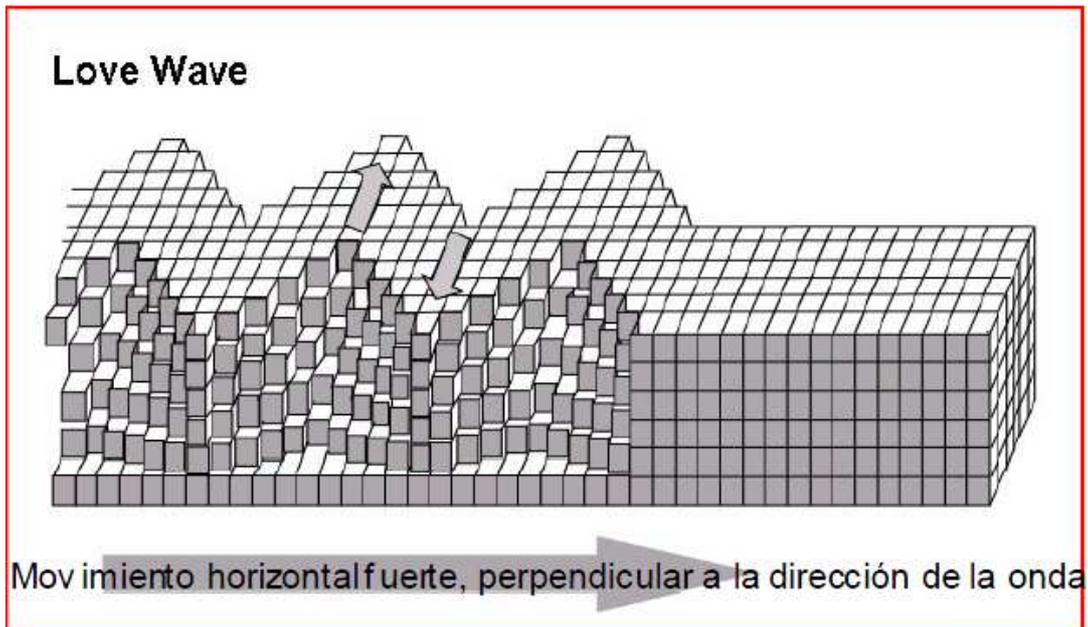


Figura III-10. Ondas Love (Cees van Westen, 2005).

Microtremores

Los Microtremores son vibraciones originados por eventos artificiales producto de actividades humanas, tales como: máquinas industriales, tránsito vehicular y peatonal, explosiones, entre otras (figura III-11). También pueden definirse como vibraciones en la superficie de la tierra debidas a la incidencia oblicua de las ondas de cuerpo que se propagan en todas direcciones con la misma energía u ondas sísmicas con energía relativamente bajas, con amplitudes dentro del rango de 10^{-3} a 10^{-4} mm (Roberts y Asten, 2004).

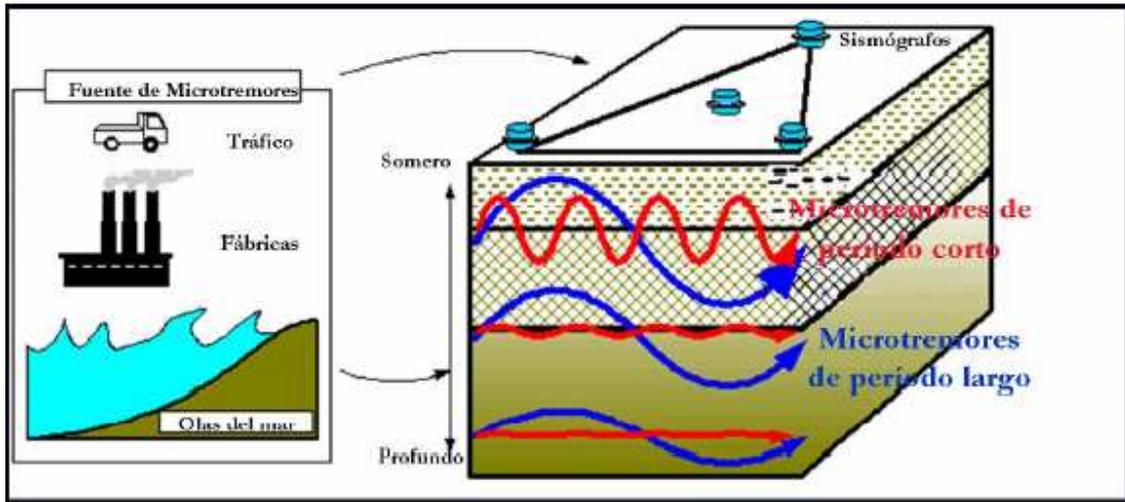


Figura III-11. Fuente de microtremores (Linares, 2005).

Los microtremores ocurren en el intervalo de 0,01 a 30 Hz, sin embargo en exploración geofísica solo interesa el rango de 0,1 a 10 Hz, ya que en esta banda, parte de la energía se transmite como onda Rayleigh, cuyos modos y velocidades de propagación se pueden medir y estimar con arreglos instrumentales para obtener información sobre las características de los parámetros elásticos de la corteza terrestre hasta profundidades de 20 Km (Flores et al., 2004). Algunas de las características de los microtremores se muestran en la tabla III-1.

Fuente	Natural	Artificial
Frecuencia	0,1 a 1.0 Hz	0,5 a 10 Hz
Origen	Oceánicas principalmente	Tráfico, Industrias, Actividades Humanas
Tipo de ondas característico	Superficiales	Superficiales + corporales
Variación en Amplitud	Relativo a Tormentas Oceánicas	Día/Noche, Semana/Fin de Semana
Incidencia de las Ondas Rayleigh/Love	Predominantemente Rayleigh	Ambas de amplitud comparable

Tabla III-1. Características de los microtremores (Pacheco, D. 2008).

Parámetros Elásticos y Geotécnicos.

A niveles bajos de deformación (0,001% para suelos), los materiales no consolidados actúan como si fuesen elásticos. Por lo tanto, si esos materiales sufren una fuerza de impacto, se generarán esfuerzos y se irradiarán desde el punto de impacto en forma de ondas elásticas. La ecuación de onda está relacionada a los diferentes módulos elásticos, por lo tanto, si se miden los parámetros que describen la propagación de las ondas en el material (velocidad, fase, dispersión) es posible calcular las diferentes propiedades elásticas del mismo (en el cual las ondas han estado viajando), utilizando técnicas de inversión y conociendo la densidad del material. Generalmente, la onda de compresión y la onda de corte, son empleadas para calcular los módulos dinámicos. Obtenidas las velocidades de cada estrato, y conociendo la densidad de la roca correspondiente (ρ), se pueden calcular las distintas constantes elásticas del medio: Radio de Poisson (ν), Módulo de Cizalla (G_{max}), Módulo de Young (E) y Módulo de Volumen (K). Dichos parámetros son de tipo cuantitativo, por lo que permiten predecir el comportamiento mecánico del suelo y son directamente aplicables dentro del diseño ingenieril, ya que alimentan modelos de predicción matemática que permiten conocer el comportamiento de las estructuras. A continuación se definen dichas constantes y sus unidades físicas están dadas en **MPa** ($1\text{Pa}=1\text{Nw/m}^2$), las cuales están condicionadas a materiales elásticos e isotrópicos, en la tabla III-2 se muestran valores para algunos materiales:

Módulo de Volumen o Incomprensibilidad (K): es la medida de la respuesta de un cuerpo ante un esfuerzo compresivo (figura III-9). Mientras más difícil resulte comprimir el material, mayor es el valor de K.

$$K = \frac{1}{3} \times \frac{E}{1-2\nu} \quad (\text{ec. III-9})$$

donde E es el modulo de Young y ν es coeficiente de Poisson.

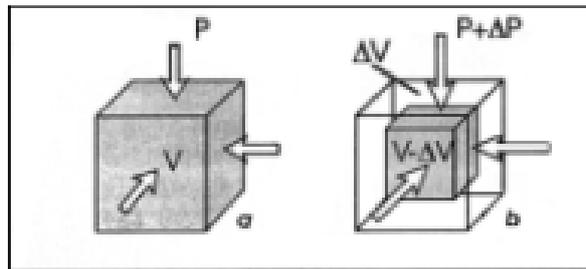


Figura III-12. Módulo de volumen o de Bulk (An Introduction to Geophysical Exploration, 2002) modificado.

Módulo de Cizalla (G0 o Gmax): también conocido como Módulo de Rigidez, se refiere a la resistencia de un cuerpo ante un esfuerzo de cizalla (figura III-19). A partir de las velocidades de las ondas sísmicas este se obtiene por la siguiente relación:

$$G = \rho V_s^2 \quad (\text{ec. III-10})$$

donde ρ es la densidad del medio.

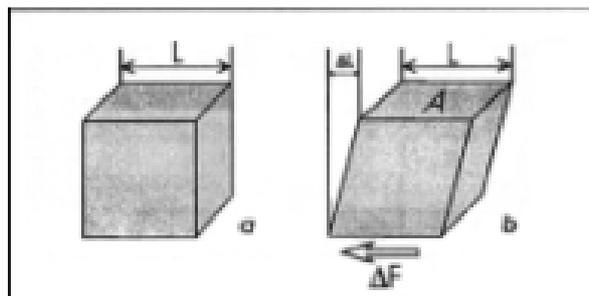


Figura III-13. Módulo de cizalla o de corte (An Introduction to Geophysical Exploration, 2002) modificado.

Módulo de Young (E): se refiere a la resistencia de un cuerpo ante un esfuerzo extensivo (figura III-20).

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (\text{ec. III-11})$$

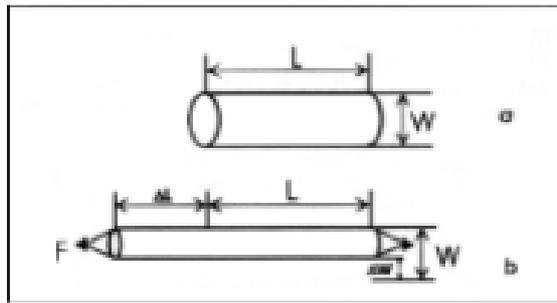


Figura III-14. Módulo de Young (An Introduction to Geophysical Exploration, 2002) modificado.

Radio de Poisson (ν): Es la relación entre las deformaciones de un cuerpo que está sometido a un esfuerzo. A partir de las velocidades de las ondas sísmicas, ν se obtiene por la siguiente relación:

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad (\text{ec. III-12})$$

Módulo de Deformación Estático E0.1%: Tanto G como E son valores máximos, para deformaciones angulares (γ) del orden de 10^{-4} . Sin embargo, se ha encontrado que la deformación angular promedio de cimentaciones bien diseñadas es de alrededor de $10^{-1}\%$. Por lo tanto para el análisis de asentamientos de zapatas (tipo de cimentación superficial, que puede ser empleada en terrenos razonablemente homogéneos y de resistencias a compresión medias o altas) y losas de cimentación partiendo de parámetros elásticos máximos (G, E) hay que reducirlos. En la figura III-20 muestra la

curva de disminución del módulo de corte (G) en función de la deformación angular (γ), se indican además valores a lo largo de la curva que pueden obtenerse con diferentes pruebas de campo. En arenas es conveniente que se use el módulo de corte G que corresponde a una deformación angular de 0.1% tal como se muestra en la Figura III-21. Fahey (1993) y Mayne (2001) proponen un valor de $G_{0.1\%}$ del 20% de G obtenidos. De aquí el módulo de elasticidad E estático para estimar el asentamiento en arenas se muestra en la siguiente fórmula empírica

$$\text{Estat (0.1\%)} = 0.54 * G \text{ (módulo de corte dinámico) en Mpa (ec. III-13).}$$

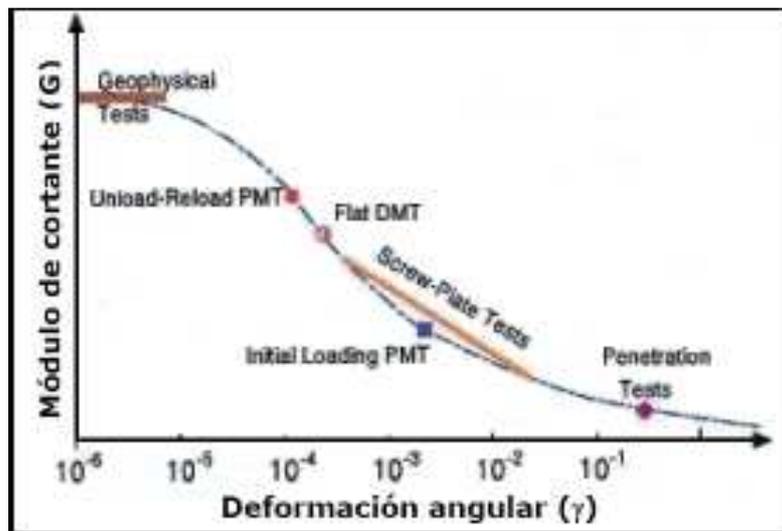


Figura III-15. Relación entre el Módulo de Corte (G) y la Deformación Angular (γ) (Lazcano, 2007).

Parámetros Geotécnicos

Vs30: Una simple manera de caracterizar las condiciones dinámicas de sitio para estudios geotécnicos y de riesgo sísmico, es realizar la clasificación de los materiales geológicos a través de las velocidades de ondas de corte del subsuelo. La velocidad equivalente para los primeros 30 m del subsuelo (V_{s30}) como se observa en la ecuación III-19, es un parámetro ampliamente usado en códigos

recientes de construcción para evaluar los efectos de sitio. Los datos derivados desde perforaciones (tanto geofísicos como geotécnicos) representan información puntual. El parámetro Vs30 es incluido en todas las fórmulas modernas de modelización lineal, de las respuestas sísmicas de un sitio y de atenuación de las aceleraciones (Cataldi, 2008).

$$Vs30 = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}} \quad (\text{ec. III-14})$$

donde h_i representa el espesor de la capa y v_i representa la velocidad de onda de corte correspondiente a h_i .

VsP: Según la norma COVENIN (2001) es la velocidad promedio de las ondas de corte en el perfil geológico hasta roca. No se refiere a ninguna profundidad específica de referencia y por lo tanto es difícil correlacionar valores de VsP de lugares diferentes.

Vs500: En la norma COVENIN es el nivel o profundidad donde se observa una velocidad de ondas de corte igual a 500 m/s. Se considera que este representa el substrato geotécnico. Conceptualmente, este valor no sigue exactamente una base geofísica o geológica.

Capacidad de Carga Permisible

Es la capacidad del terreno a soportar los esfuerzos (cargas) aplicados al mismo. De forma más específica, es la presión de contacto promedio máxima entre el cimiento y el suelo que no debe producir fallas de corte en ese último. Es un parámetro ampliamente utilizado en la ingeniería geotécnica para la caracterización geotécnica de sitio, previa a la construcción de una estructura (Rojas, 2008). La capacidad de carga para cimientos someros puede ser descrita en función de la velocidad de ondas de corte medidas en sitio por métodos

geofísicos, de acuerdo con una expresión empírica propuesta por Tezcan et al. (2006), basada en una variedad de casos, que incluyen datos de pozo, pruebas de laboratorio y prospección geofísica. Esta expresión es consistente con los resultados de la teoría clásica empleada en la investigación de este parámetro (capacidad de carga), probando ser confiable y segura, en la tabla III-3 se muestran algunos valores de capacidad de carga diferentes materiales.

Table 1. Recommended ranges of allowable bearing capacities (kPa)

Soil type		N_{60}	c'_u	ϕ'_{av}	v_s	q_a (kPa) ^b					
No.	Cohesive soils ^a	–	kPa	degree	m/s	100	200	300	400	500	600
1	Very soft clays and silts	0–2	0–20	20	0–100	50					
2	Soft clays and silts	2–4	20–50	22	0–200	75					
3	Medium stiff clays	4–8	50–100	24	200–350	75	150				
4	Stiff clays	8–15	100–150	26	200–600	100	250				
5	Very stiff clays, boulders	15–30	150–200	28	450–800	200	350				
6	Hard clays, boulders	30–50	200–400	30	600–900	250	400				
7	Very hard clays	50–R	400–600	30	800–1200	350	500				
No.	Granular soils	N_{60}	D_r	ϕ'_{av}	v_s						
1	Very loose sand	0–4	0–20	28°	0–100	50					
2	Loose sand and gravel	4–10	20–35	30°	100–350	50	150				
3	Medium dense sand, gravel	10–30	35–65	32°	250–700	100	300				
4	Dense sand and gravel	30–50	65–85	37°	600–1100	250	450				
5	Very dense sand and gravel	50–R	85–99	40°	800–1500	350	600				

c'_u = undrained effective shear strength (kPa), D_r = relative density (percent), ϕ'_{av} = average effective internal angle of friction (degrees), v_s = shear wave velocity (m/s), q_a = allowable soil bearing pressure (kPa).

^aNormally consolidated clays.

^bIf the foundation base is below the GWT, use the lower values of q_a within the range.

Capacidad q_a	= 0.00024*densidad*Vs=???kPa
-----------------	------------------------------

Tabla III-2. Capacidad de carga para los materiales según Uniform Building Code (1997), modificada.

Caracterización de Suelos

Existen a nivel nacional e internacional diversos criterios para la clasificación de suelos, en las que se considera el valor de la onda de corte, V_{s30} , resistencia a los esfuerzos de corte en suelos no drenados como parámetro de referencia. En este trabajo se utilizan como referencia la norma **IBC-NEHRP-**

ASCE (International Building Code, USA) y la norma **COVENIN** (Venezuela, 2001). Estas normas son usadas para la evaluación y optimización de los parámetros que son mundialmente considerados antes de construir edificaciones y estructuras industriales. El valor de V_{s30} generalmente se usa como un parámetro directamente relacionado con la consistencia del terreno, es por ello que es mundialmente aplicado en los diferentes códigos de clasificación de suelo. Estas recomendaciones se refieren a la respuesta del terreno frente a movimientos sísmicos y específicamente a los efectos de amplificación de las ondas de corte a nivel superficial. En las tablas III-4 y III-5 se muestran los parámetros considerados en este trabajo:

TABLA IBC 1615.1.1: Definición de Clase de suelos				
CLASE	MATERIAL	Promedio de Parámetros para los primeros 30m, según la sección 1615.1.5		
		Velocidad de onda de corte $V_{s30}(m/s)$	Resistencia a la penetración Estándar N	Resistencia al esfuerzo de corte en Suelo no drenado, $S_u(kg/cm^2)$
A	Roca Dura	$V_s > 1530$	No Se Aplica	No Se Aplica
B	Roca	$760 < V_s \leq 1530$	No Se Aplica	No Se Aplica
C	Suelo Denso / Roca Blanda	$360 < V_s \leq 760$	$N > 50$	$S_u \geq 1$
D	Suelos Firmes	$180 < V_s \leq 360$	$15 \leq N \leq 50$	$0.5 \leq S_u \leq 1$
E	Suelos Blandos	$V_s < 180$	$N < 15$	$S_u < 0.5$
E		Algunos perfiles de suelo con mas de 3m tienen las siguientes características: 1. Índice de plasticidad $IP > 20$; 2. Contenido de humedad $\omega \geq 40\%$, y 3. Resistencia al esfuerzo de corte en suelo no drenado $S_u < 0.5$		
F		Algunos de los Perfiles de Suelo tienen una o mas de las siguientes características: 1. Suelos vulnerables al posible quiebre o colapso bajo la carga sísmica, como los suelos licuables y arcillas orgánicas altamente sensibles, suelos colapsables débilmente cementados. 2. Materia vegetal parcialmente descompuesta y/o alto contenido de arcillas orgánicas ($H > 3.048m$ de materia vegetal parcialmente descompuesta y/o alto contenido de arcillas orgánicas donde H = espesor del suelo). 3. Plasticidad de arcillas muy altas ($H > 7.62m$ con índice de plasticidad $IP > 75$) 4. Rigidez de arcillas suave/media para arcillas ($H > 36.576m$)		

Tabla III-3. Tabla IBC (International Building Code) de clasificación de suelos, modificada.

Material de Suelo	Velocidad de onda (m/s)	Altura (m)	Zonas Sísmicas 1 a 4		Zonas Sísmicas 5 a 7	
			Forma Espectral	Factor ϕ	Forma Espectral	Factor ϕ
Roca dura	> 500	--	S1	0.85	S1	1.00
Roca suave, suelos muy duros o muy densos	> 400	< 30	S1	0.85	S1	1.00
		30-50	S2	0.80	S2	0.90
		> 50	S3	0.70	S2	0.90
Suelos duros o densos	250-400	< 15	S1	0.80	S1	1.00
		15-50	S2	0.80	S2	0.90
		> 50	S3	0.75	S2	0.90
Suelos firmes o semi-densos	170-250	≤ 50	S3	0.70	S2	0.95
		> 50	S3	0.70	S3	0.75
Suelos suaves o flojos	< 170	≤ 15	S3	0.70	S2	0.90
		> 15	S3	0.70	S3	0.80
Suelos suaves o flojos con capas de suelos más rígidos	--	H ₁	S2	0.65	S2	0.70

Tabla III-4. Tabla Covenin de clasificación de suelos según la Vs.

CAPITULO IV

METODOS APLICADOS

Método de Refracción por Microtremores (ReMi)

El método de sismica de Refracción por Microtremores (ReMi) fue desarrollado por Louie (2001), es uno de los métodos más recientes para el estudio de las ondas superficiales, específicamente para modelar la estructura de la velocidad de la onda S a partir del análisis de la curva de dispersión de la onda Rayleigh. Este método se basa en dos ideas fundamentales: la primera es que se emplean los equipos de refracción tradicional, la segunda idea es que una simple transformada 2D de lentitud-frecuencia (p - f) de un registro de microtremor, puede separar las Ondas Rayleigh de otras llegadas sísmicas, y permitir el reconocimiento de la velocidad de fase verdadera de las velocidades aparentes (Louie, 2001). El procesamiento consiste en la aplicación de los siguientes algoritmos:

Análisis Espectral de Velocidad (p - f)

El análisis espectral está basado en la transformación p - τ o "slantstack", descrito por Thorson y Claerbout (1985). Esta transformación toma una sección de registros de sismogramas múltiples, con amplitudes relacionadas con la distancia y el tiempo (x - t), y las convierte a amplitudes relacionadas con el parámetro de rayo p (inverso de la velocidad aparente), y un intercepto de tiempo τ . Clayton y McMechan (1981) y otros autores usaron la transformada p - τ como un paso inicial para el análisis de de la velocidad de refracción en ondas p (Louie, 2001).

La transformada p - τ es una integral de línea a lo largo de un registro sísmico $A(x,t)$ en una distancia x y un tiempo t .

$$A(p, \tau) = \int_x A(x, t = \tau + px) dx \quad (\text{ec. IV-1})$$

Donde la pendiente de la línea $p=dx/dt$ es el inverso de la velocidad aparente V_a en la dirección de x . En práctica x está discretizada en intervalos nx con espaciado finito dx (usualmente desde 8 hasta 20 metros), así que $x=jdx$, con j como un número entero. Del mismo modo, el tiempo está discretizado con $t=idt$ (con dt usualmente 0,001-0,01 segundo), dando una forma discreta de la transformada p - τ para positivos y negativos $p = p_0 + dp$ y $\tau = kdt$, llamado slantstack (Louie, 2001):

$$A(p = p_0 + dp, \tau = kdt) = \sum_{j=0, nx-1} A(x = jdx, t = idt = \tau + px) \quad (\text{ec. IV-2})$$

Comenzando con un $p_0 = -p_{max} \cdot p_{max}$ define el inverso de la velocidad mínima que se encontrará, usualmente se coloca en 200 m/s, pero se encuentra en 100 m/s o menos para sitios suaves particulares. np se coloca efectivamente para que sea uno o dos veces nx . Aquí dp puede variar entre 0,0001 hasta 0,0005 seg/m, y se coloca para que cubra el intervalo desde $-p_{max}$ a p_{max} en incrementos de lentitud de $2np$. Esto analizará la energía que se propaga en ambas direcciones a lo largo de la línea receptora de refracción. Las amplitudes en tiempos $t = \tau + px$, que varían en los puntos muestreados, son estimados por interpolación lineal (Louie, 2001).

En el próximo paso, se toma cada traza p - τ en $A(p, \tau)$ (ec. IV-1) y se calcula su transformada de Fourier compleja $F_A(p, f)$ en la dirección de τ o de tiempo de intercepción:

$$F_A(p, f) = \int_{\tau} A(p, \tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (\text{ec. IV-3})$$

Para la cual la transformada de Fourier discreta con $f=mdf$ es

$$F_A(p, f = mdf) = \sum_{k=0, nt-1} A(p, \tau = kdt) e^{-i2\pi mdf kdt} \quad (\text{ec. IV-4})$$

Para llevar a cabo una buena resolución en la frecuencia, se requieren tiempos más largos en los registros, a diferencia de los que típicamente se usan en los trabajos de refracción sísmica (Louie, 2001).

El espectro de Potencia $S_A(p, f)$ es la magnitud cuadrada de la transformada de Fourier compleja:

$$S_A(p, f) = F_A^*(p, f)F_A(p, f) \quad (\text{ec. IV-4})$$

En donde * denota la conjugada compleja. Este método suma conjuntamente dos transformadas p -tau de un registro, a lo largo de la línea receptora, ya sea en las direcciones “forward” (hacia adelante) o “reverse” (hacia atrás) de la misma (Louie, 2001). Para sumar la energía de esas direcciones, en un eje de lentitud, que representa el valor absoluto de $p, |p|$, se suma alrededor de $p=0$ con

$$S_A(|p|, f) = [S_A(p, f)]_{p \geq 0} + [S_A(-p, f)]_{p < 0} \quad (\text{ec. IV-5})$$

Esto completa la transformada de Fourier de un registro desde el espacio distancia-tiempo ($x-t$) al de p -frecuencia ($p-f$). El parámetro de rayo p de estos registros es la componente horizontal de lentitud (inverso de la velocidad) a lo largo del arreglo. Para analizar más de un registro, a partir de la potencia espectral total en todos los registros de un sitio, que se grafica en los ejes ($p-f$). Si se logran identificar tendencias en donde una fase coherente tiene una potencia significativa, entonces, para el análisis de dispersión, se pueden seleccionar los “picks” lentitud-frecuencia en un diagrama típico período-velocidad (Louie, 2001).

La transformada p -tau actúa como un filtro pasa bajos $1/\text{frecuencia}$, sobre las amplitudes en los datos. Sin embargo, este filtro no distorsiona o influye en las frecuencias. La transformada apila cada tiempo de intercepto a lo largo de líneas paralelas, así que no hay ningún “stretch” o distorsión de la frecuencia, como lo hay en el “normal-moveout” o velocidad de apilamiento a lo largo de hipérbolas (Thorson y Claerbout, 1985).

McMechan y Yedlin (1981) desarrollaron la técnica $p-f$ y la probaron en ondas superficiales sintéticas, y reverberaciones vistas en registros de sismica multicanal con una fuente controlada. Park et al. (1998) aplicó la técnica $p-f$ a los registros de una fuente activa MASW. Todas las fases en los registros están presentes en las imágenes resultantes ($p-f$), que indican la potencia en cada combinación de lentitud de fase y frecuencia. Las fases dispersivas muestran las curvas distintas de los modos normales, en capas superficiales de baja velocidad: la pendiente de fase más baja (baja lentitud), en bajas frecuencias, a velocidades de fase más altas (alta lentitud), en frecuencias más grandes. Millar (2000) examina el espectro de potencia en el dominio $p-f$ de los registros MASW, a lo largo de un perfil, para definir las variaciones laterales en las curvas de dispersión, y por lo tanto en las velocidades de cizalla (Louie, 2001).

En el análisis $p-f$ la distinción de la pendiente característica de la onda dispersiva es una de las ventajas. Las otras llegadas que aparecen en los registros de microtemores, tales como ondas de cuerpo y de aire, no tienen dicha pendiente. La imagen de potencia espectral $p-f$ mostrará en donde tales ondas tienen energía significativa. Incluso si en un registro sísmico, la mayoría de la energía tiene una fase distinta a la de las ondas de Rayleigh, los análisis $p-f$ separarán esa energía de la curva de dispersión que se interpreta en esta técnica, en un gráfico lentitud frecuencia (figura III-12) (Louie, 2001).

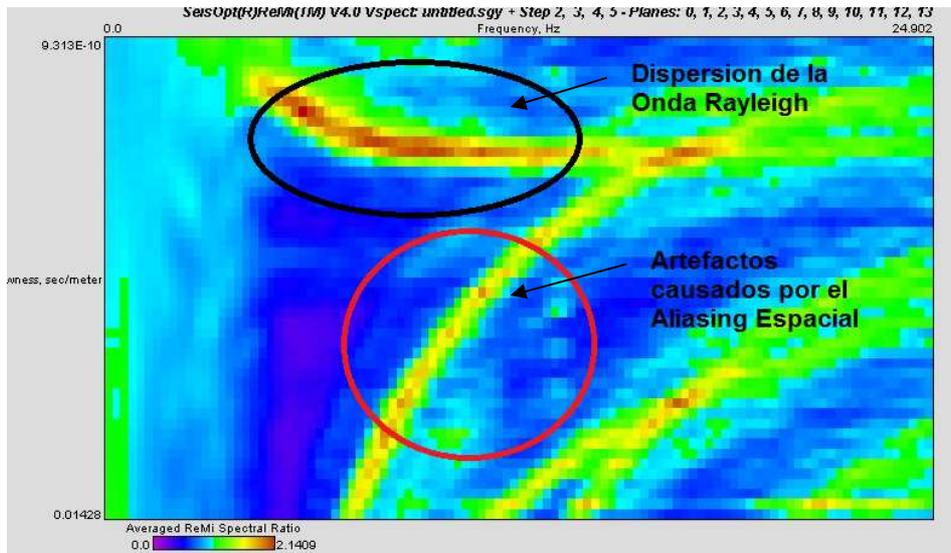


Figura IV-1. Curva de dispersión característica de la onda Rayleigh (*ReMi VSpect*).

Selección de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh

Este análisis solo agrega un cálculo de la tasa de potencia a la técnica de McMechan y Yedlin (1981). Consiste principalmente en transformar los campos de ondas de los datos, al dominio lentitud-frecuencia (p - f), en donde la curva puede ser seleccionada directamente. Este proceso envuelve dos transformaciones lineales: un slantstack seguido por una transformada de Fourier en una dimensión (1-D) (Vásquez, T. 2008).

La potencia promedio sobre todas las lentitudes puede ser diferente en órdenes de magnitud de una frecuencia a otra. Este método toma la tasa espectral $R(|p|, f)$ de la potencia en cada combinación de lentitud-frecuencia en contra de la potencia promedio alrededor de todas las lentitudes-frecuencias, con imágenes p - f individuales $S_A(|p|, f)$, o en una imagen total $S_{total}(|p|, f)$:

$$R(|p|, f) = S(|p|, f)np / [\sum_{j=0, np-1} S(|p| = ldp, f)] \quad (\text{ec. IV-6})$$

Con np la mitad del número original de pasos de lentitud $2np$. La escogencia de las velocidades de fase en las frecuencias en donde no hay una pendiente o un pico en la tasa espectral, claramente localiza la curva de dispersión. La selección no se hacen en frecuencias sin un pico definido en la tasa espectral, o en donde no aparezca una onda superficial dispersiva identificable, la selección se hace a lo largo de una envolvente de baja velocidad, bordeando el espectro de energía que se observa en la imagen p - f (Louie, 2001).

Como el modo más alto de las ondas Rayleigh tiene velocidades de fase por encima de las que tienen modo fundamental, la técnica de sísmica de microtemores produce principalmente las velocidades con modos fundamentales. Los modos más grandes pueden aparecer como tendencia de dispersión separadas de las imágenes p - f , si son lo cercanamente energéticas como las fundamentales (Louie, 2001).

El “Aliasing” espacial (es el fenómeno de corrupción de la forma de la transformada de Fourier en un dominio fundamental como consecuencia de la discretización, Aldana, 2002) contribuirá a la aparición de “artefactos” en las imágenes de tasa espectral lentitud-frecuencia. La pendiente de los artefactos en las imágenes p - f , está en una dirección opuesta a la dispersión del modo normal (Louie, 2001).

Modelado de la velocidad de la onda de corte

El método ReMi realiza un modelado interactivo hacia adelante de la curva de dispersión (en modo fundamental), seleccionada a partir de las imágenes Lentitud-frecuencia p - f , el modo itera sobre la velocidad de fase en cada periodo (o frecuencia), reporta cuando una solución no ha sido encontrada dentro de los parámetros de iteración, y puede modelar inversiones de velocidad con la profundidad (Louie, 2001).

Interactivamente se puede estimar, además, la máxima profundidad de la velocidad, y si los datos pueden excluir las transiciones de las grandes velocidades justo por debajo de esta profundidad. Debido a que el método de sísmica de microtemores no depende de una inversión de las dispersiones escogidas para la estructura de la velocidad, la parte de la técnica del modelo seguido es la más dependiente de las habilidades del intérprete (Louie, 2001). En la figura III-13 se muestra un ejemplo de modelado de onda de corte en el método ReMi.

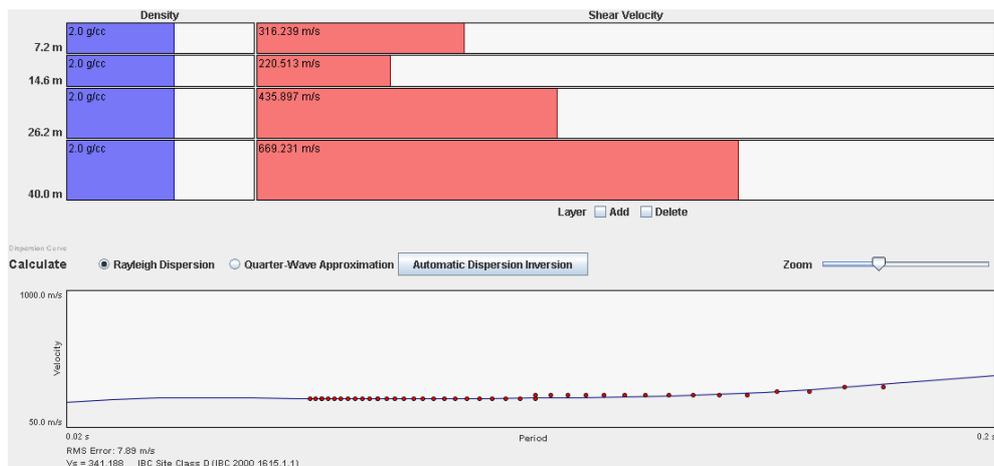


Figura IV-2. Modelo de onda de corte (ReMi Disper Software).

Método de pozo DownHole (DH)

En el método sísmico DownHole (DH) se mide el tiempo necesario en que las ondas P y S al propagarse desde una fuente sísmica colocada en la superficie son detectadas por receptores ubicados en el interior de un orificio de sondeo. El procedimiento de ejecución de estas medidas es sencillo, se coloca el sensor en una determinada posición dentro del pozo o perforación y se efectúan al menos tres registros independientes: Para un impacto vertical para generar ondas P y para dos impactos tangenciales de sentidos contrarios para generar ondas S (figura III-14 a y b). El estudio completo del sondeo se hace repitiendo el proceso anterior para distintas posiciones del sensor distribuidos normalmente a intervalos del orden de un metro.

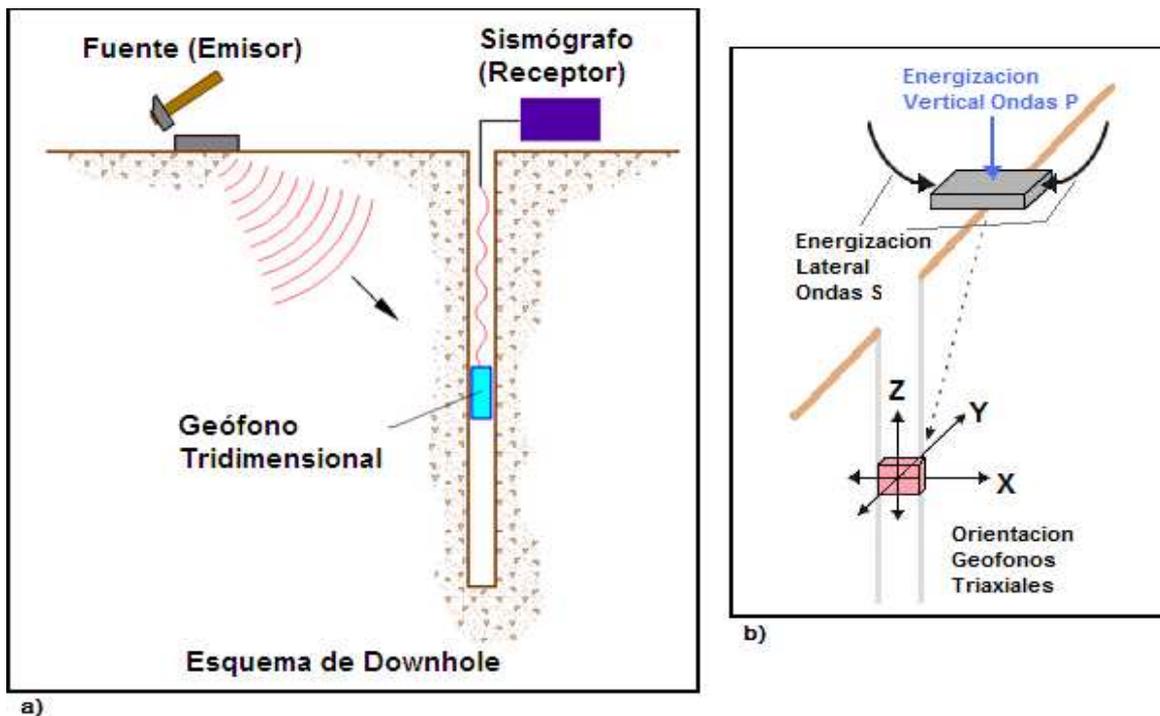


Figura IV-3. a) Esquema de método DownHole. b) Fuente de energía para generar ondas S y P (Geostru, 2009).

El procedimiento para el procesamiento de los registros de DownHole, las diversas etapas para determinar a partir de los registros geofísicos los valores de V_p y V_s son las siguientes:

- Identificación en los sismogramas de las primeras llegadas de las ondas de compresión y de cizalla (figura III-15) determinando el tiempo de viaje de cada onda en recorrer la distancia existente entre el punto donde se genera la señal y el geófono triaxial donde se registra. Esta fase del estudio es de gran importancia, especialmente en lo que se refiere a las ondas de cizalla que son las más difíciles de reconocer en los sismogramas o registros sísmicos.

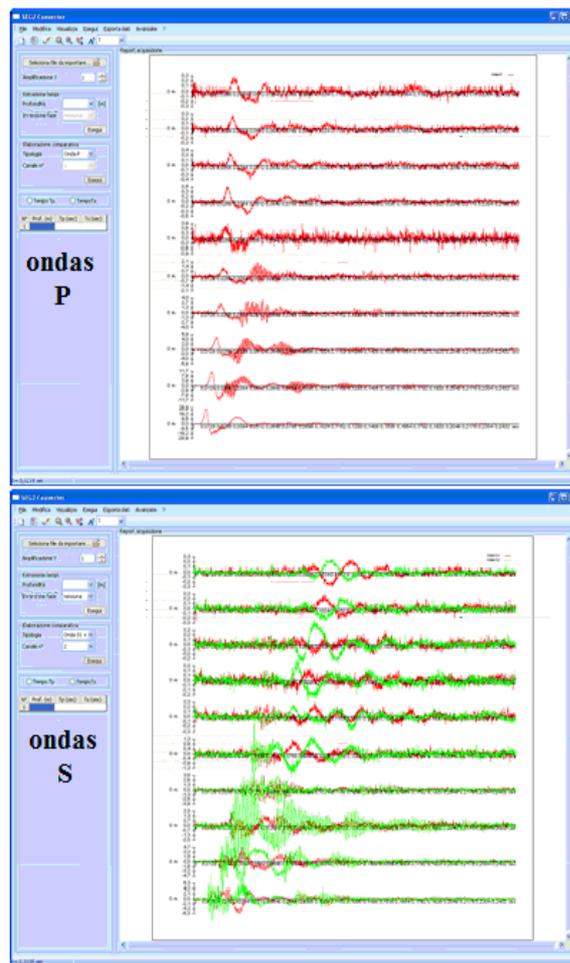


Figura IV-4. Identificación de las llegadas en el sismograma (Geostru, 2009).

- Para poder interpretar el Método DownHole, es necesario e importante corregir los tiempos de trayecto (t) de las ondas, medidos a lo largo los recorridos desde la fuente hasta receptor, para tener en cuenta la inclinación el recorrido de las ondas. Si d es la distancia de la fuente del eje del orificio (figura III-16), r la distancia entre la fuente y el geófono triaxial, z la profundidad de medida es posible obtener Los tiempos correctos (t_{corr}) mediante la siguiente fórmula de conversión:

$$t_{corr} = \frac{z}{r} t \quad (\text{ec. IV-7})$$

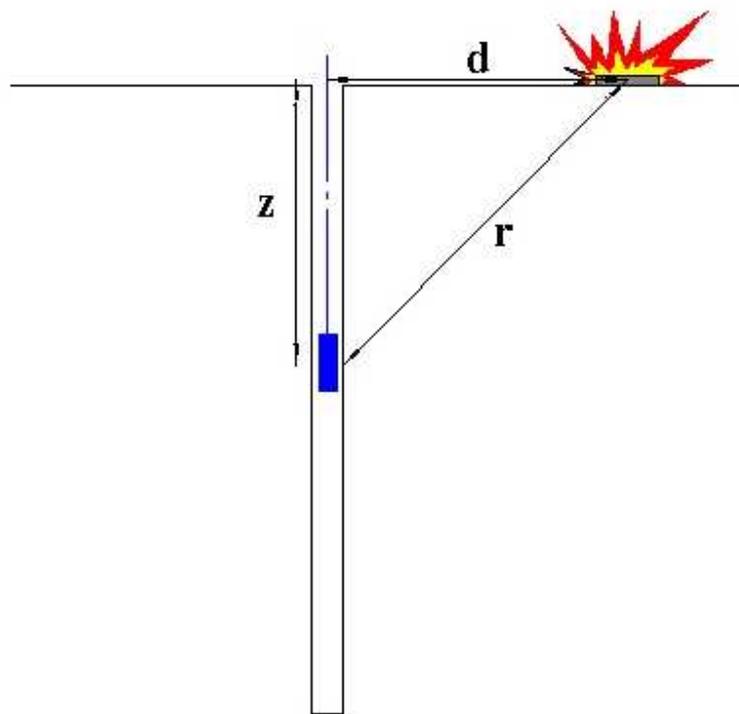


Figura IV-5. Parámetros para la obtención de tiempos corregidos (Geostru, 2010).

- Una vez calculados los tiempos corregidos ya sea para las ondas P y para las ondas S se realiza la construcción para cada sondeo de un gráfico profundidad vs. tiempos corregidos (dromocróna) como se muestra en la figura III-17. En este grafico la corresponde en las abscisas la distancia

existente entre el punto de señal y el geófono situado en el sondeo y en las ordenadas los tiempos de las primeras llegadas. Estos gráficos se construyen independientemente para las ondas P y para las ondas S, aunque comúnmente se representan de forma conjunta en un mismo gráfico (ver figura III-15).

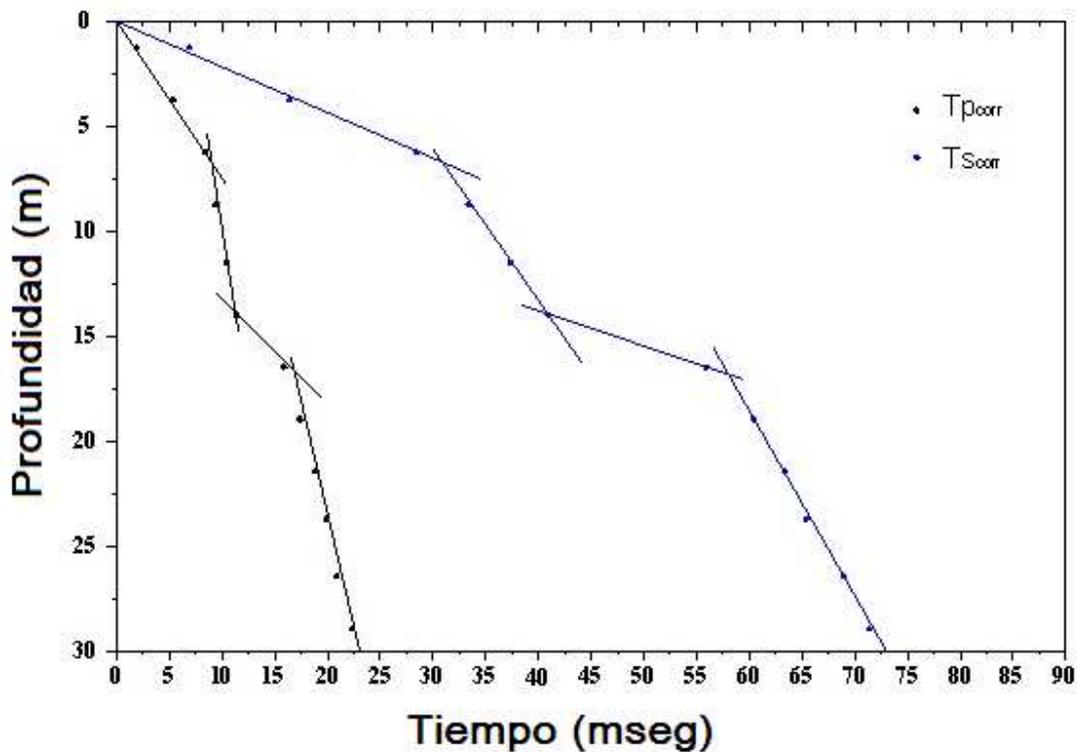


Figura IV-6. Grafico de profundidad vs tiempos de llegada corregidos (Dromocrona).

- Cálculo de los valores de V_p y V_s para cada uno de los “estratos” del subsuelo que se muestran de forma diferenciada en las dromocrónicas. En estos gráficos cada “capa” cuyos valores de V_p y V_s sean diferentes a los de las capas contiguas se manifiesta como un tramo de pendiente diferente. La inversa de la pendiente determina la velocidad (V_p o V_s) del estrato o capa.

CAPITULO V

INSTRUMENTOS Y ADQUISICION

Refracción por Microtremores (ReMi)

Instrumentos y Equipos

Para el método de Refracción por Microtremores se emplearon los siguientes equipos:

- **Sismógrafo:** Seismic Source-Daq Link III (figura IV-1)



Figura V-1. Sismógrafo Seismic Source-Daq Link III (Cortesía de TRX Consulting).

Características de sismógrafo **Seismic Source-Daq Link III:**

Resolución: 24-Bit.

Canales por unidad: 24 (Muestreo simultáneo).

Tasa de muestreo: 8 ms, 4 ms, 2 ms, 1 ms, 500us, 250 us, 125 us.

Ganancia de entrada Pre-Amp: x1, x10 o x100.

Máximo Voltaje de entrada: 25 V- opción acelerómetro, 25 V opción geófono.

Máxima capacidad de registro: >3600 s.

Formatos de exportación de datos: SEG-Y, SEG-2 o ASCII.

- **Geofonos (4.5 Hz)** (figura IV-2).



Figura V-2. Geófono de 4.5 Hz (Cortesía de TRX Consulting).

- **Mandarria de 6 Kg – 8 Kg.**
- **Placa metálica.**
- **Computador de campo** (figura IV-3).



Figura V-3. Computador de campo (Cortesía de TRX Consulting).

- **GPS Garmin.**
- **Batería de 12 Voltios.**

ADQUISICION

Refracción por Microtremores (ReMi)

- Fecha de adquisición: Del 12 al 18 de Febrero del 2010

La adquisición consistió en 6 tendidos sísmicos repartidos en cada estación, excepto en la estación Guatire 2 donde se realizaron 5 tendidos sísmicos (limitados por el espacio físico de la zona). En las Estaciones Guarenas 1, Guarenas 2 y Guatire 1, se llevaron a cabo estos tendidos o líneas sísmicas en ambos canales de la autopista Guarenas-Guatire y en la parte central (ubicada en la isla que divide ambos canales). Es importante destacar que estos tendidos fueron ubicados cercanos a la perforación del DownHole con la finalidad de realizar el estudio comparativo, además complementar información y comprobar su eficiencia en la caracterización del subsuelo. Se usó el sistema de coordenadas geográficas WGS84.

Se utilizó el sismógrafo DAQ Link III de 24 canales (24 geófonos) con 8 metros de separación entre geófonos (de 4.5 Hz) (ver figura IV-4), el software para la adquisición usado en campo fue VScope para la configuración del sismógrafo y grabación los registros sísmicos. Dichos registros eran generados por el ruido ambiental (tránsito vehicular y otras actividades humanas) sumado a esto se utilizó una fuente activa (mandarria) para mejorar la señal de alta frecuencia y obtener mejor resolución a niveles más superficiales. Se adquirieron 6 registros de ruido ambiental y 6 registros con la aplicación de la fuente activa en cada extremo del tendido. La tasa de muestreo fue de 2ms y los tiempos de registros de 20 seg.



Figura V-4. Segmento del tendido de adquisición ReMi (estación Guarenas 1, Cortesía de TRX Consulting).

Método DownHole (DH)

Instrumentos y equipos

- **Sismógrafo: Seismic Source-Daq Link III** (figura IV-1).
- **Geófono triaxial DH: Pasi DHTG-50** (figura IV-5).

Frecuencia Geófono Triaxial		10 Hz (Geospace)
Largo del cable		50 m
Fuente de poder		12 V, batería interna recargable
Motor		Eléctrico, 12 V, 10 W
Diámetro de la sonda		47 mm
Largo de la sonda		680 mm
Diámetro del pozo (estándar)		Min. 70 mm y máx. 170 mm

Figura V-5. Geófono triaxial DH: Pasi DHTG-50 (Cortesía de TRX Consulting).

- **Mandarria de 6 Kg - 8 Kg.**
- **Placa metalica.**
- **Fuente para generar ondas S (figura IV-6).**



Figura V-6. Fuente de ondas S (Cortesía de TRX Consulting).

- **Computador de campo.**
- **GPS Garmin.**
- **Batería de 12 Voltios.**

ADQUISICION

Método DownHole (DH)

- Fecha de adquisición: Del 01 al 04 de Marzo del 2009

La implementación se llevo a cabo tomando en cuenta los siguientes parámetros:

1. Profundidad pozo.
2. Presencia y condición de la tubería (encamisado): Tubo PVC de 3 pulgadas (aproximadamente 7.5 cm) cementado (grouted).
3. Profundidad nivel agua en pozo.

En primer lugar, se usó un testigo de prueba para determinar la profundidad de la perforación antes de introducir la sonda triaxial. Posteriormente se colocó la fuente de onda P y onda S a una distancia del pozo de aproximadamente 1,5 a 1,8 metros (distancia optima para una buena recepción de señal) (figura IV-7).



Figura V-7. Fuente de ondas S y ondas P (Cortesía de TRX Consulting).

Finalmente la sonda triaxial se introduce en la perforación y se baja metro a metro y desde la superficie se generan impulsos con impactos verticales (mandarria) y horizontales (fuente mecánica-mandarria) que generan respectivamente las ondas V_p y V_s (figura IV-8 y IV-9).



Figura V-8. Impactos de mandarria para generar ondas P (Cortesía de TRX Consulting).



Figura V-9. Impactos con el balancín para generar ondas S (Cortesía de TRX Consulting).

En el caso de las ondas de corte (ondas S) se usó una fuente mecánica que garantiza fuerza en el impulso. Esto es un balancín con un peso basculante de 10 kg que golpea una plancha instalada y anclada a la rueda de un carro y al piso. A fin de favorecer una clara identificación de las ondas de corte y la selección de la primera llegada, se generan dos grupos de impulsos, SH1 y SH2 (uno por cada lado del carro) que serán correlacionados en el procesamiento. Tanto la plancha para la generación de la velocidad de onda P (V_p) como los puntos batientes del balancín para la generación de las velocidades de ondas S (V_p) son localizados en forma equidistante del cabezal del pozo (distancia Offset) a 1,4 m. Por cada profundidad se adquieren diferentes grupos de medidas para las componentes P, SH1 y SH2 que son almacenadas en formato SEG2.

CAPITULO IV

PROCESAMIENTO

Refracción por Microtremores (ReMi)

En primer lugar, por cada línea se realizaron nueve modelos que permitieron la obtención de velocidades en diferentes puntos, en este caso cada modelo se llevo a cabo con una separación de 28 metros, con el objetivo de tener la distribución espacial de la velocidad de onda S en cada estación de la transecta.

Seguidamente los datos fueron procesados utilizando el software VSpect v4.0 de **Optim software**. Inicialmente los datos se almacenan en archivos cuya extensión es “*.vsp”, estos archivos deben ser exportados al formato SEG-Y, para poder ser procesados. Este software está dividido en dos módulos. El primer modulo es el **ReMi VSpect**, transforma cada registro sísmico ReMi a un espectro de energía (frecuencia vs. lentitud) (ver marco teórico) en el que se obtiene una curva de dispersión qué punto a punto se debe seleccionar la tendencia de dicha curva. El segundo módulo es **ReMi Disper**, éste permite a partir de la curva de dispersión realizar un modelo de capas y profundidad de velocidades de ondas de corte.

Módulo **ReMi VSpect**.

Este módulo se divide en 6 etapas fundamentales que serán detalladas a continuación:

1. Abrir los archivos sísmicos SEG-Y

Este primer paso permite seleccionar los archivos SEG-Y. Luego de ser abiertos, se verifica el número y el tiempo total de los registros. Para este proyecto se tomaron 18 registros sísmicos.

2. Pre-procesamiento de Datos

La finalidad de realizar este paso es obtener una ganancia de ecualización de trazas y una centralización de todas, promediando los valores y eliminando los picos de amplitud. Mostrando un gráfico de Número de trazas vs. Tiempo total ecualizado.

3. Borrar o Aplicar Geometría

Permite introducir o borrar la geometría usada en campo, en este caso se elimina la geometría debido a que los tendidos de adquisición fueron realizados en zonas donde no existían cambios abruptos de elevación.

4. Cálculo del espectro de velocidad para cada registro

Después de borrar la geometría, se calcula la transformada p-f de todos los registros. En este procedimiento se obtuvo una imagen de tasa espectral de la dispersión fase-velocidad de una onda superficial, mediante las transformadas p-tau y Fourier a cada traza. Seguido a esto se imprime en pantalla el gráfico de lentitud-frecuencia (p-f).

En este paso se introducen parámetros como:

- Intervalo de muestreo (dt).
- Separación entre geófonos (dx).
- Frecuencia máxima de análisis (Fmax).
- Velocidad mínima en el área de investigación (Vmin).
- Numero de lentitudes para altas velocidades, depende de la frecuencia, numero de trazas, espaciamiento y la distancia total.
- Dirección del origen de las ondas sísmicas de corte. Para este estudio se usaron ambas direcciones, debido a que se realizaron impactos de fuente activa en los extremos de los tendidos.

5. Combinación p-f de los registros

Este paso permitió apilar las imágenes p-f calculadas para cada registro en una sola imagen. Donde finalmente se muestra la curva de dispersión definitiva, observándose el comportamiento dispersivo de las ondas Rayleigh, las velocidades más altas corresponden a las frecuencias más bajas.

6. Selección de la curva de dispersión

Consistió en seleccionar punto a punto la tendencia de la curva de dispersión. Para esto, se deben tomar los puntos que están en la transición entre el azul y el verde, la razón principal es que en esta transición está el modo fundamental de onda Rayleigh (ver figura V-1). El comportamiento de la onda Rayleigh es dispersivo (la curva decae), las curvas que no tienen la misma tendencia que el modo fundamental corresponden a los llamados artefactos (no tienen importancia en el estudio). Los puntos seleccionados son guardados en el formato “.txt”, para ser usados en el siguiente modulo (ReMi Disper).

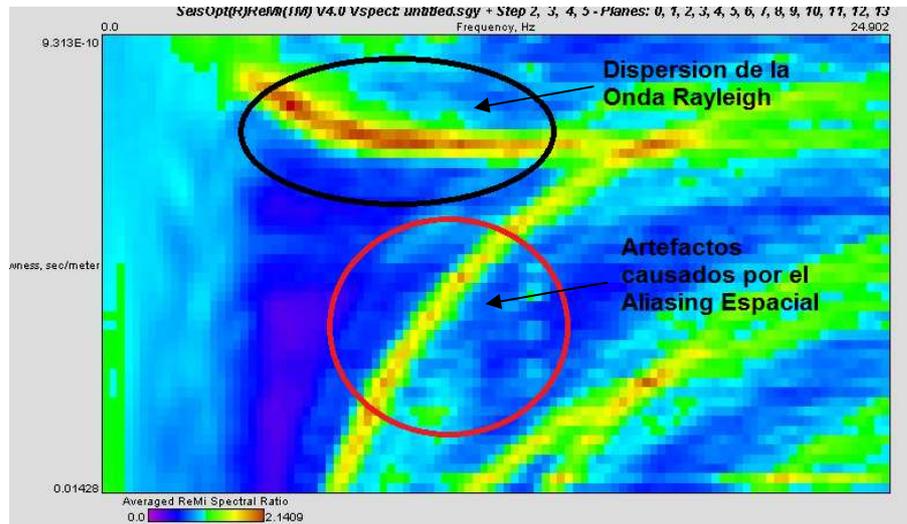


Figura VI-1. Curva de dispersión de la onda Rayleigh (ReMi VSpect).

Módulo *ReMi Disper*

Este módulo utiliza un algoritmo iterativo de modelado de dispersión, basado en el método descrito por Saito (1975), permite realizar un modelo geológico de espesor, número de capas y velocidades de ondas de corte luego de abrir los archivos con los puntos seleccionados en el módulo anterior (*ReMi VSpect*). Se muestra en pantalla la gráfica de Velocidad vs. Período, además del modelo sismo estratigráfico, que se calibra hasta obtener un modelo que posea el menor error. Este módulo muestra la clasificación de suelos según la IBC (International building code), y la velocidad equivalente a los 30 metros (V_{s30}) (figuraV-2)

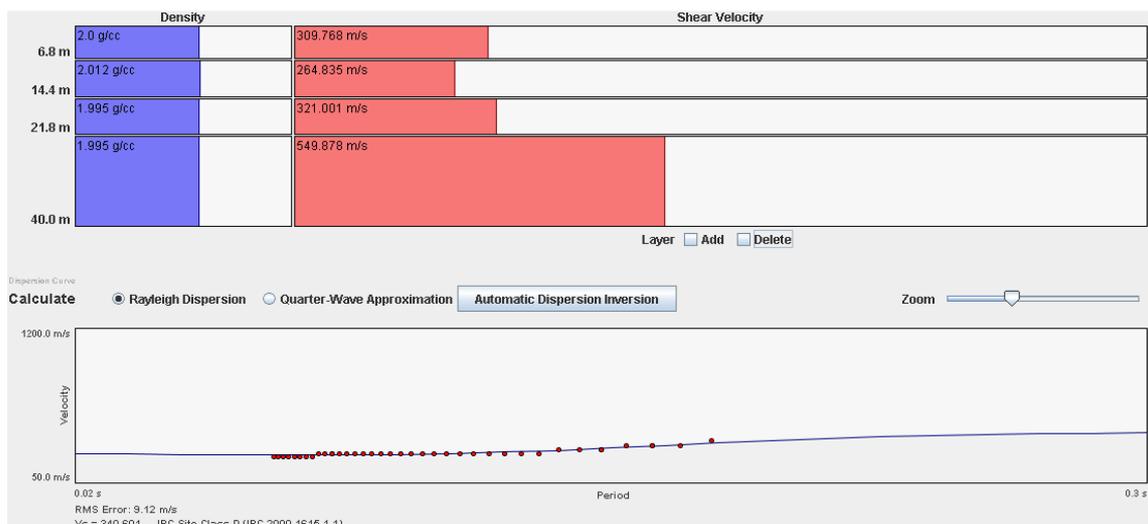


Figura VI-2. Modelo geológico generado a partir de la curva de dispersión.

Obtención de Modelos de V_s

Cada geófono luego de la adquisición recibe un registro sísmico, por lo tanto se pueden hacer combinaciones entre geófonos para obtener el número de modelos que se deseen, para este trabajo se crearon 5 modelos para cada tendido de la siguiente forma o combinación: del 1 al 8, del 5 al 12, del 9 al 16, del 13 al 20, del 17 al 24, al realizarse un solape de 8 geófonos en el segundo tendido

se realizan solo 4 combinaciones, teniéndose un total de 9 modelos de velocidad de onda de corte para cada línea constituida por 2 tendidos.

Cálculo de la Rigidez G a partir de los valores de Vs obtenidos con el método ReMi

Luego de obtener el modelo sismo estratigráfico o modelo geológico de velocidad de onda de corte, se puede determinar el módulo de cizalla o rigidez G, y así realizar mapas de isoprofundidad, es decir, calcular a partir de los modelos obtenidos la rigidez para diferentes profundidades, en este caso 5, 7, 10, 15, 20 metros. Esto se realizó creando una base de datos con coordenadas y valores de Rigidez correspondientes a esas coordenadas y profundidades, graficándolas en el software Surfer 9. Con la finalidad de estimar el comportamiento dinámico del suelo ante esfuerzos de corte.

Método DownHole (DH)

El procesamiento de los datos se realizó en el software Geostru DH y consistió de los siguientes pasos:

1. Selección de las primeras llegadas.

Este paso consiste en el “picking” o selección de las primeras llegadas de la onda s y p, luego estos tiempos se introducen en una tabla llamada tiempos de trayecto y la profundidad en el intervalo utilizado, en este caso el intervalo en el cual se descendía la sonda fue metro a metro. Además se incluyen otros parámetros tales como:

- Offset de estallido: posición de la fuente generadora de ondas (s y p).
- Número de recepciones: este parámetro indica el número de medidas tomadas en el pozo en el intervalo de descenso predeterminado.

- Primera posición de medida: indica la posición inicial desde donde comienza la medición.

Luego de completar la lista de parámetros, el software automáticamente realiza la corrección de los tiempos de llegada (ver marco teórico).

2. Gráfica de la Dromocrona.

En este paso se grafican los tiempos de llegada corregidos (eje X) con respecto a la profundidad (eje Y), luego se observan las tendencias de estos tiempos para determinar los cambios de inclinación de pendiente. Estos cambios de pendiente muestran variaciones en las propiedades físicas del subsuelo por lo tanto cambios en la velocidad, lo que indica que existe otro estrato o capa. Esta gráfica recibe el nombre de **Dromocrona** (ver marco teórico) (figura III-16).

Cálculo de velocidades V_s y V_p y parámetros elásticos.

Finalmente después de obtener la Dromocrona se calculan los valores de velocidad para la onda s y onda p, seguidamente se determinan los parámetros dinámicos (ver marco teórico) por profundidad (interválicos), además mediante la manipulación del software se puede realizar el cálculo de la estratificación sísmica y los parámetros elásticos promedio (figura V-3).

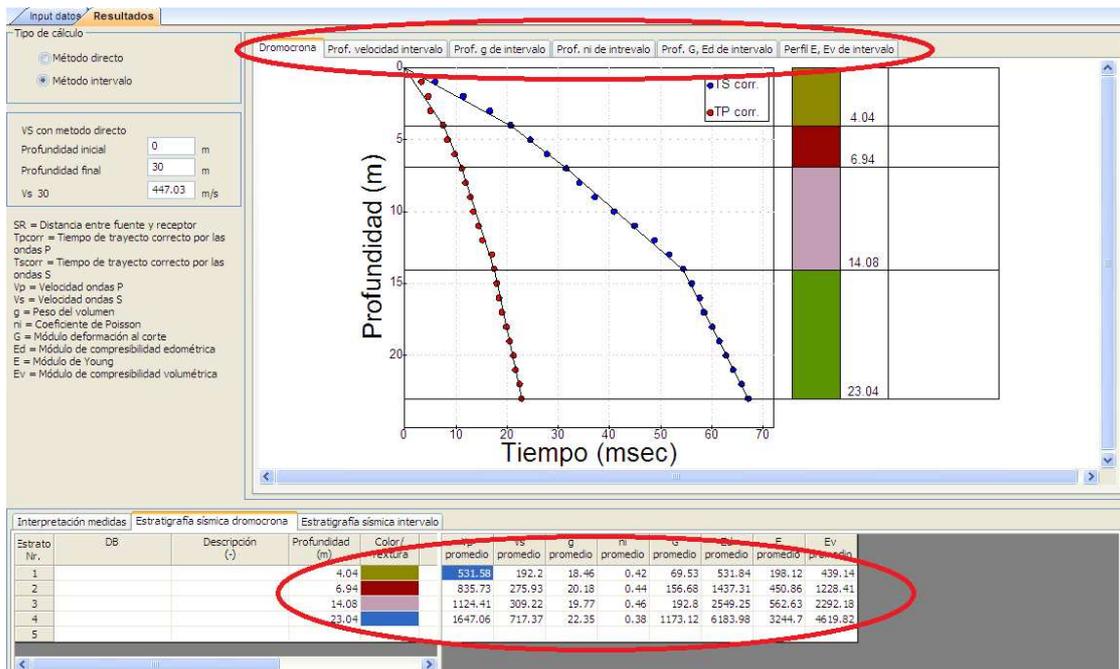


Figura VI-3. Dromocrona y definición de la estratificación sísmica (DH2010).

CAPITULO VII

RESULTADOS Y ANALISIS

Para este estudio se consideraron los entornos geológicos presentes en la zona de Guarenas – Guatire, donde a nivel superficial se encuentra una capa de relleno o sedimentos aluviales. Después de esta capa superficial se observa lo siguiente en las Estaciones:

- **Estación Guarenas 1 y Estación Guarenas 2:** Secuencia sedimentaria Holocénica.
- **Estación Guatire 1 y Estación Guatire 2:** Secuencia sedimentaria Pleistocénica (Formación Guatire).

Estación Guarenas 1

Sísmica DownHole (DH).

En esta perforación (28 metros), se identifica un modelo de 4 unidades sísmo estratigráficas con sus valores promedios de velocidad de onda P, velocidad de onda S además de espesores (figura VI-1). La unidad más superficial se interpreta como material suelto de relleno y/o coluvión poco compactado con Vs promedio de 273,4 m/s, Vp promedio de 511,4 m/s y espesor aproximado de 9 m. El estrato siguiente representa una inversión de velocidad de material aluvional más blando (arcillas/limos) con un espesor aproximado de 6 m y con velocidades promedio de 238,4 m/s y 482,5 m/s para la Vs y Vp respectivamente. Seguidamente se interpreta un nuevo estrato más compactado con velocidades de 405,3 m/s de Vs y 754,4 m/s de Vp con un espesor aproximado de 7 m. En la parte final de la secuencia se diferencia otro estrato con velocidades de 526,2 m/s y 1052,5 m/s de Vs y Vp respectivamente, interpretado como suelos muy duros según la norma COVENIN (Venezuela), compuesto igualmente por material aluvional compactado. Estos valores de velocidad y espesor se muestran en la tabla VI-1.

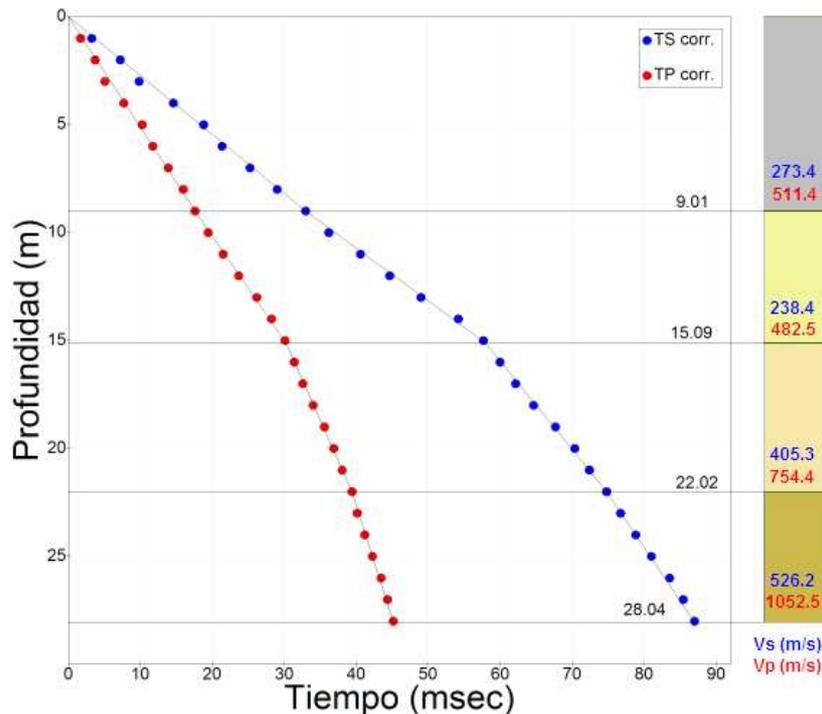


Figura VII-1. DH Estación Guareñas-1. Modelo sismo - estratigráfico interpretado con valores promedio de velocidad para cada unidad sísmica.

Capa	Espesor m	Prof. m	Vp m/s	Vs m/s
1	9.1	9.1	511.4	273.4
2	6.0	15.1	482.5	238.4
3	6.9	22.0	754.4	405.3
4	----	----	1052.5	526.2

Tabla VII-1. DH Estación Guareñas 1. Prueba DownHole, modelo estratigráfico.

Sísmica Refracción por MicroTremores (ReMi)

En este modelo de ReMi se identifican 4 unidades sismo estratigráficas con valores de Vs para cada unidad, también se muestra el valor teórico que tendría Vp (figura VI-2) en cada capa, es decir, $1,7V_s$. Este valor de Vp es calculado por el software de procesamiento, pero para este trabajo de investigación no se toma en cuenta para determinar los parámetros elásticos ya que no son valores reales, solo se utilizan para tenerlos como referencia y observar la relación aproximada

entre ambas velocidades, cabe destacar que el centro de este modelo se encuentra sobre la perforación del DownHole.

En cuanto a los valores de Vs, se tiene que la capa más superficial tiene un valor de 268,5 m/s correspondiente a material suelto de relleno y/o coluvión poco compactado y un espesor aproximado de 7,6 m. La capa siguiente indica la presencia de una inversión de velocidad de material aluvional más blando (arcillas/limos) con un espesor aproximado de 8 m y una velocidad de 241,8 m/s. Seguidamente se encuentra una capa mas compactada con una velocidad de 338 m/s y un espesor de 11 m. Finalmente se identifica un último estrato cuya velocidad es de 526 m/s. Estos valores de velocidad y espesor se muestran en la tabla VI-2.

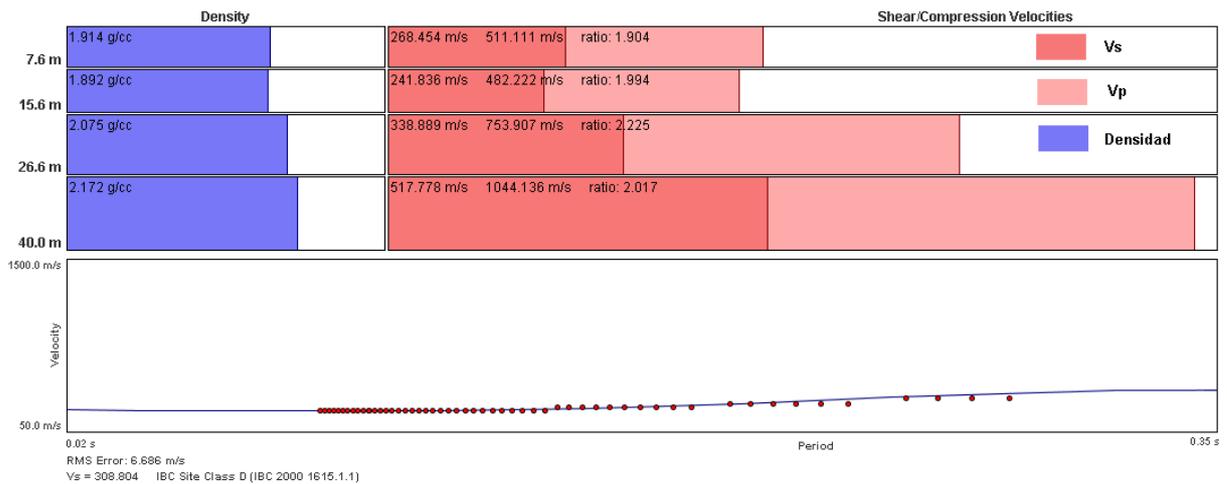


Figura VII-2. Estación Guarenas 1. Modelo sismo - estratigráfico, interpretado con valores de velocidad para cada unidad sísmica.

Capa	Espesor m	Prof. m	Vp m/s	Vs m/s
1	7.6	6.1	511.1	268.5
2	8.0	15.6	482.2	241.8
3	11.0	26.6	753.9	338.9
4	----	>40.0	1044.1	517.8

Tabla VII-2. ReMi Estación Guarenas 1. Refracción por micro tremores, modelo estratigráfico.

En la tabla VI-3 se observa un cuadro comparativo de velocidades promedio de onda de corte para cada una de las capas. Con ambos métodos (ReMi y Downhole) los valores de velocidad para cada estrato tienen muy buena relación entre si, también se puede distinguir que en la segunda capa ambos métodos detectan la presencia de una capa con inversión de velocidad, esto deja en evidencia la capacidad de estos dos métodos para estos casos (con refracción sísmica no se pueden ver inversiones de velocidad), salvo para la tercera capa los valores de velocidad no concuerdan entre sí, lo que indica que el ruido presente en la zona influye en la aplicación del método DownHole. En líneas generales existe una muy buena relación entre capas y velocidades.

TABLA COMPARATIVA DE VS		
CAPA	Vs (DH)	Vs (ReMi)
1	273.4	268.5
2	238.4	241.8
3	405.3	338.9
4	526.2	517.8

Tabla VII-3. Comparación entre Velocidades obtenidas con DH y ReMi en la estación Guarenas 1.

A continuación se muestra en la figura VI-3, la correlación metro a metro de velocidades de ondas de corte para cada uno de los métodos (28 metros), y en la tabla del lado izquierdo se observan las velocidades interválicas de ondas P y ondas S obtenidas con el método DownHole, las velocidades mostradas en la

correlación, son provenientes del modelo sismo – estratigráfico (figura VI-2) Remi y valores obtenidos con el método DH.

Profundidad (m)	Vp m/s	Vs m/s
-1	589.1	307.7
-2	494.4	252.7
-3	395.5	220.8
-4	379.6	209.8
-5	393.3	276.3
-6	456.7	264.2
-7	465.9	256.8
-8	479.1	265.4
-9	611.5	252.5
-10	547.8	310.6
-11	483.5	277.3
-12	461.9	245.8
-13	396.8	230.3
-14	489.7	192.5
-15	534.3	287.1
-16	779.7	433.9
-17	846.7	460.5
-18	695.1	400.4
-19	634	329.7
-20	771	372.7
-21	864.5	408.9
-22	721.8	395.7
-23	955.8	382.9
-24	947.9	367.4
-25	948.4	401.8
-26	823.9	392.7
-27	957.6	386.2
-28	937.5	396.7

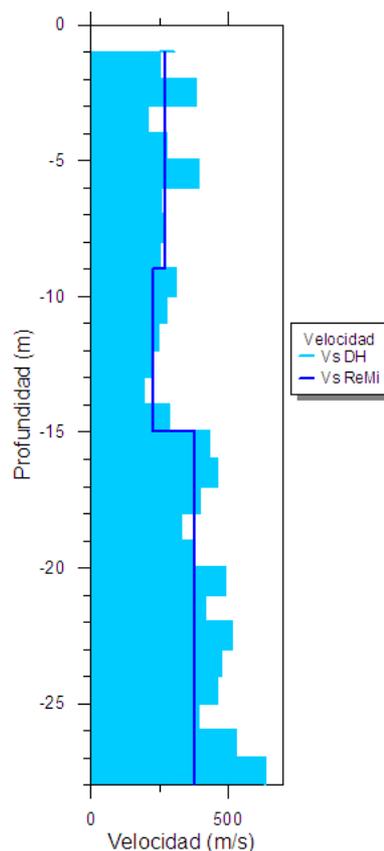


Figura VII-3. Estación Guarenas 1. Correlación entre Velocidades obtenidas con DH y ReMi.

Estación Guarenas 2

En este caso, se identifica un modelo de 4 unidades sismo estratigráficas (figura VI-4) con sus valores promedio de velocidad de onda P, velocidad de onda S además de espesores. La unidad más superficial se interpreta como material suelto de relleno y/o coluvión poco compactado con Vs promedio de 241,1 m/s, Vp promedio de 483,7 m/s y espesor aproximado de 9 m. El estrato siguiente corresponde a material aluvional ligeramente más compactado (coluvión), con un espesor aproximado de 7 m y con velocidades promedio de 298,6 m/s y 599,5 m/s para la Vs y Vp respectivamente. Seguidamente se interpreta un nuevo estrato de mayor grado de compactación con velocidades de 353,2 m/s de Vs y 784,1 m/s de Vp con un espesor aproximado de 9 m. En la parte final de la secuencia se diferencia un substrato con velocidades de 574,2 m/s y 944,7 m/s de Vs y Vp respectivamente, interpretado como suelos muy “duros-densos” según la norma COVENIN, compuesto igualmente por material aluvional compactado. Estos valores de velocidad y espesor se muestran en la tabla VI-4.

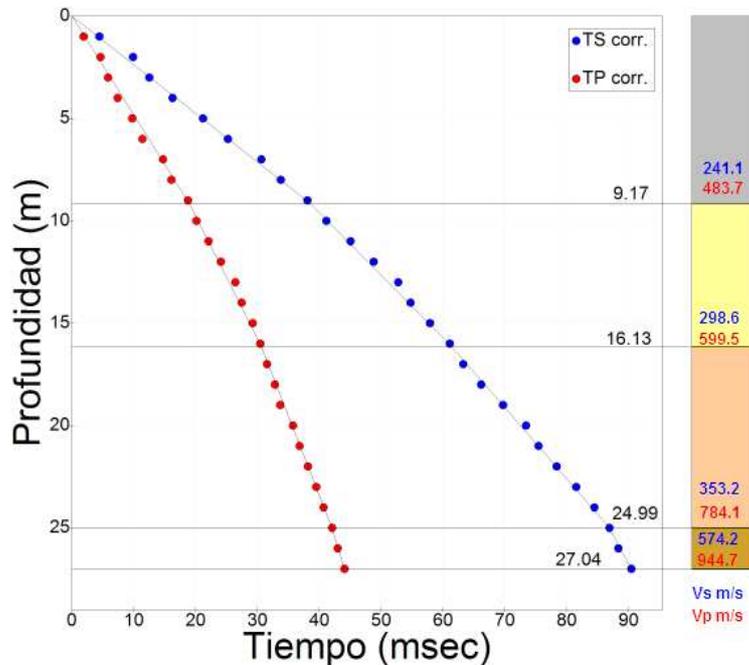


Figura VII-4. DH Estación Guarenas 2. Modelo sismo - estratigráfico interpretado con valores promedio de velocidad para cada unidad sísmica

	Espesor	Prof.	Vp	Vs
Capa	m	m	m/s	m/s
1	9.1	9.1	483.7	241.1
2	7.0	16.1	599.5	298.6
3	9.0	25.0	784.1	353.2
4	----	>40	944.7	574.2

Tabla VII-4. DH Estación Guarenas 2. Prueba DownHole, modelo estratigráfico.

Sísmica Refracción por Micro Tremores (ReMi)

En este modelo de ReMi (figura VI-5) se identifican 4 unidades sismo estratigráficas con valores de Vs para cada unidad. Se tiene que la capa más superficial tiene un valor de 241,1 m/s correspondiente a material suelto de relleno y/o coluvión poco compactado de espesor aproximado de 9,2 m. En la siguiente capa se identifica la presencia de material aluvional ligeramente más blando (coluvión) con un espesor aproximado de 8,2 m y una velocidad de 278,9 m/s. Seguidamente se localiza un estrato más compactado con una velocidad de 330 m/s y un espesor de 9 m. Finalmente se encuentra un estrato cuya velocidad es de 538 m/s. Estos valores de velocidad y espesor se muestran en la tabla VI-5.

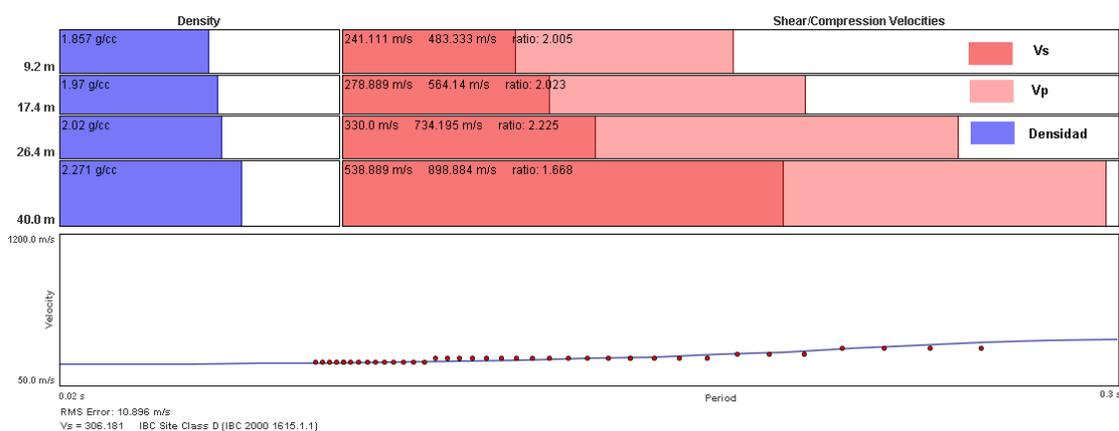


Figura VII-5. ReMi Estación Guarenas 2. Modelo sismo - estratigráfico, interpretado con valores de velocidad para cada unidad sísmica.

Capa	Espesor	Prof.	Vp	Vs
	m	m	m/s	m/s
1	9.2	9.2	483.3	241.1
2	8.2	17.4	564.1	278.9
3	9.0	26.4	734.2	330.0
4	----	>40.0	898.9	538.9

Tabla VII-5. ReMi Estación Guarenas 2. Refracción por micro tremores, modelo estratigráfico.

En la tabla VI-6 se observa un cuadro comparativo de velocidades promedio de onda de corte para cada una de las capas. La relación obtenida indica que con ambos métodos los valores de velocidad de onda de corte se asemejan para cada estrato, en este caso se observa un aumento gradual en la velocidad en profundidad, esto se puede asociar a la presión de soterramiento de los sedimentos, a pesar del ruido presente en la aplicación del método DownHole, los dos métodos se correlacionan de manera óptima.

TABLA COMPARATIVA DE VS		
CAPA	Vs (DH)	Vs(ReMi)
1	241.1	241.1
2	298.6	278.9
3	353.2	330.0
4	574.2	538.9

Tabla VII-6. Comparación entre Velocidades obtenidas con DH y ReMi en la estación Guarenas 2.

En la figura VI-6 se observa la correlación metro a metro de velocidades de ondas de corte para cada uno de los métodos (27 metros), y en la tabla del lado izquierdo se muestran las velocidades interválicas de ondas P y ondas S obtenidas con el método DownHole, las velocidades mostradas en la correlación, son provenientes del modelo sismo – estratigráfico (figura VI-5) ReMi y las obtenidas con el método DH. En líneas generales ambas velocidades obtenidas son similares para cada capa.

Profundidad (m)	Vp m/s	Vs m/s
-1	537.6	227.0
-2	462.7	210.8
-3	521.9	241.6
-4	563.8	266.9
-5	423.1	202.8
-6	519.3	248.3
-7	459.8	185.2
-8	513.8	221.5
-9	374.7	227.1
-10	608.4	339.2
-11	513.3	254.6
-12	498.8	267.2
-13	429.1	253.4
-14	525.8	286.3
-15	558.7	318.3
-16	812.6	313.7
-17	836.8	458.9
-18	859.7	344.3
-19	825.6	365.7
-20	842.5	358.6
-21	938.4	329.5
-22	727.5	355.1
-23	749.6	315.0
-24	844.7	324.8
-25	723.0	395.4
-26	936.7	468.2
-27	906.6	477.0

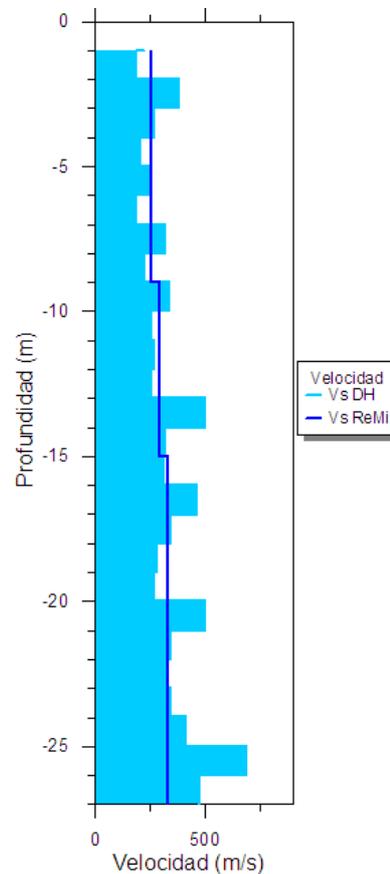


Figura VII-6. Estación Guarenas 2. Correlación entre Velocidades de onda de corte obtenidas con DH y ReMi.

Estación Guatire 1

Se identifica un modelo de 4 unidades sismo estratigráficas (figura VI-7) con sus valores promedios de velocidad de onda P, velocidad de onda S además de espesores. La unidad más superficial se interpreta como material suelto de relleno y/o coluvión poco compactado con Vs promedio de 263,8 m/s, Vp promedio de 579,9 m/s y espesor aproximado de 9 m. El estrato siguiente corresponde a material aluvional ligeramente más compactado (coluvión), con un espesor aproximado de 9 m y con velocidades promedio de 332,7 m/s y 698,1 m/s para la Vs y Vp respectivamente. Seguidamente se interpreta un nuevo estrato que

representa una inversión de velocidad, con valores de 314,0 m/s de Vs y 448,5 m/s de Vp con un espesor aproximado de 7 m. En la parte final de la secuencia se diferencia un substrato con velocidades de 387,1 m/s y 723,4 m/s de Vs y Vp respectivamente, interpretado como suelos duros-densos según la norma COVENIN, compuesto igualmente por material aluvional compactado/consolidado. Estos valores de velocidad y espesor se muestran en la tabla VI-7.

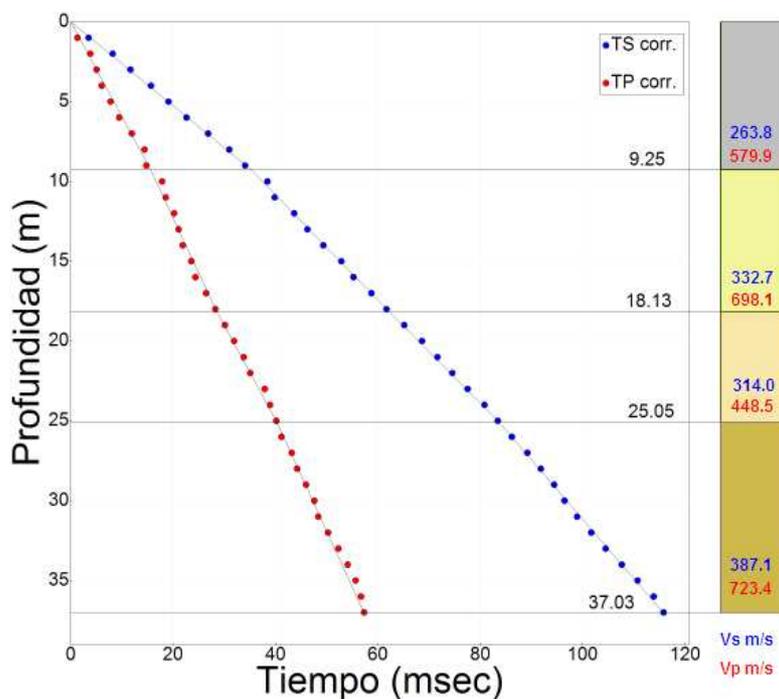


Figura VII-7. DH Estación Guatire-1. Modelo sismo - estratigráfico interpretado con valores promedio de velocidad para cada unidad sísmica.

Capa	Espesor	Prof.	Vp	Vs
	m	m	m/s	m/s
1	9.1	9.1	579.9	263.8
2	9.0	18.1	698.1	332.7
3	7.1	25.1	448.5	314.0
4	----	>40	723.4	387.1

Tabla VII-7. DH Estación Guatire 1. Prueba DownHole, modelo estratigráfico.

Sísmica Refracción por Micro Tremores (ReMi)

En este modelo de ReMi (figura VI-8) se identifican 4 unidades sismo estratigráficas (figura VI-8) con valores de Vs para cada unidad, se tiene que la capa más superficial tiene un valor de 255,6 m/s correspondiente a material suelto de relleno y/o coluvión poco compactado y un espesor aproximado de 8,8 m. La capa siguiente corresponde a material aluvional ligeramente más compactado (coluvión) con un espesor aproximado de 9,4 m y una velocidad de 347,8 m/s. Seguidamente se encuentra una capa donde se observa una inversión de velocidad la cual es 305,6 m/s y un espesor de 8 m. Finalmente se localiza un estrato cuya velocidad es de 385,6 m/s. Estos valores de velocidad y espesor se muestran en la tabla VI-8.

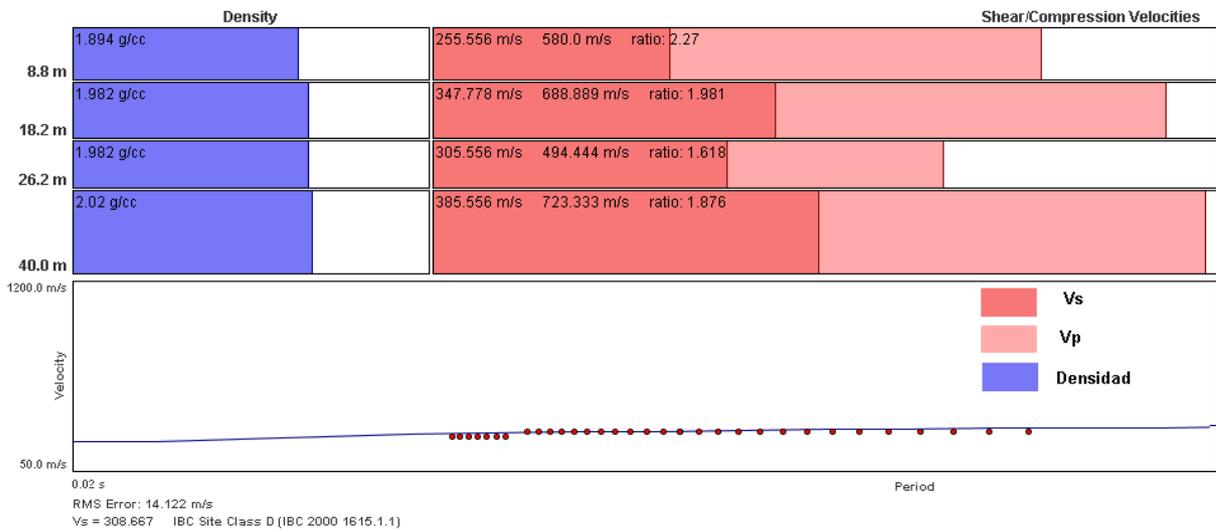


Figura VII-8. ReMi Estación Guatire 1. Modelo sísmo – estratigráfico, interpretado con valores de velocidad para cada unidad sísmica.

Capa	Espesor	Prof.	Vp	Vs
	m	m	m/s	m/s
1	8.8	8.8	580.0	255.6
2	9.4	18.2	688.9	347.8
3	8.0	26.2	494.4	305.6
4	----	>40.0	723.3	385.6

Tabla VII-8. ReMi Estación Guatire 1. Refracción por micro tremores, modelo estratigráfico.

En la tabla VI-9 se observa un cuadro comparativo de velocidades de onda de corte para cada una de las capas. La relación obtenida indica que para ambos métodos se asemejan los valores de velocidad para cada estrato, en la tercera capa se muestra una inversión de velocidad, es decir, la velocidad en este caso no aumenta con la profundidad, sin embargo ambos métodos fueron capaces de detectar este caso particular, los valores de velocidad obtenidos están muy bien correlacionados.

TABLA COMPARATIVA DE VS		
CAPA	Vs (DH)	Vs(ReMi)
1	263.8	255.6
2	332.7	347.8
3	314.0	305.6
4	387.1	385.6

Tabla VII-9. Comparación entre Velocidades obtenidas con DH y ReMi en la estación Guatire 1.

En la figura VI-9 se observa la correlación metro a metro de velocidades de ondas de corte para cada uno de los métodos (37 metros), y en la tabla del lado izquierdo se muestran las velocidades interválicas de ondas P y ondas S obtenidas con el método DownHole, cabe destacar que las velocidades mostradas en la correlación, son provenientes del modelo sismo – estratigráfico (figura VI-8) ReMi y las velocidades obtenidas con el método DH. En líneas generales ambas velocidades obtenidas son similares para cada capa.

Profundidad (m)	Vp m/s	Vs m/s
-1	770.1	286.8
-2	395.6	211.5
-3	482.3	289.9
-4	479.5	249.5
-5	398.7	292.1
-6	387.5	283.0
-7	404.4	237.1
-8	404.5	242.8
-9	467.2	324.7
-10	414.1	228.6
-11	578.9	360.8
-12	607.3	263.0
-13	496.7	385.0
-14	473.5	322.8
-15	606.4	284.0
-16	468.5	295.6
-17	477.4	285.2
-18	557.0	340.6
-19	539.1	289.6
-20	557.2	288.1
-21	530.8	332.0
-22	532.2	325.8
-23	533.7	316.8
-24	489.5	302.3
-25	505.8	384.8
-26	612.1	365.3
-27	612.2	328.3
-28	779.0	379.3
-29	824.0	385.2
-30	815.9	405.8
-31	824.5	410.6
-32	827.9	359.1
-33	838.6	356.6
-34	826.7	316.1
-35	528.7	324.3
-36	815.6	318.2
-37	838.9	522.4

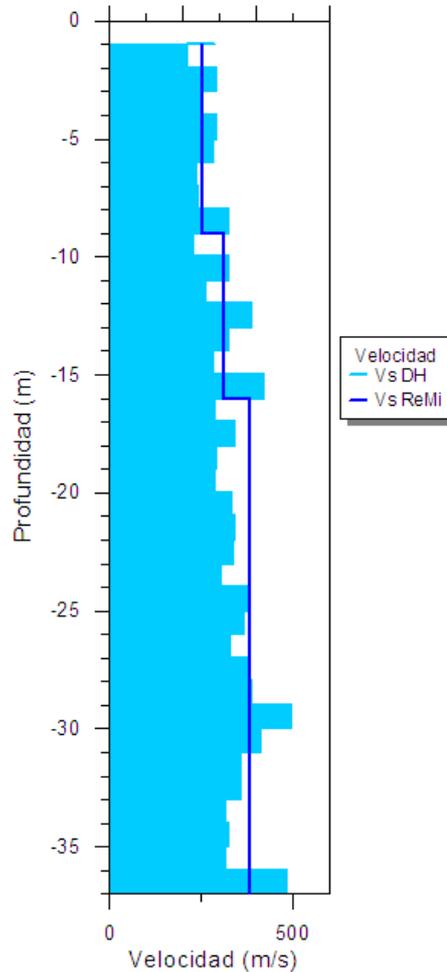


Figura VII-9. Estación Guatire 1. Correlación entre Velocidades obtenidas con DH y ReMi.

Estación Guatire 2

Sísmica DownHole (DH)

Se identifican 4 unidades sísmo estratigráficas (figura VI-10) con sus valores promedios de velocidad de onda P, velocidad de onda S además de espesores. La unidad más superficial se interpreta como material suelto de relleno y/o coluvión poco compactado con Vs promedio de 319,8 m/s, Vp promedio de 619,9 m/s y espesor aproximado de 6 m. El estrato siguiente corresponde a

material aluvional ligeramente más compactado (coluvión), con un espesor aproximado de 5 m y con velocidades promedio de 358,1 m/s y 713,6 m/s para la Vs y Vp respectivamente. Seguidamente se interpreta un nuevo estrato con valores promedio de 450 m/s de Vs y 875 m/s de Vp con un espesor aproximado de 18 m. En la parte final de la secuencia se diferencia un substrato con velocidades de 515,9 m/s y 1254,7 m/s de Vs y Vp respectivamente, interpretado como suelos “muy duros-densos” según la norma covenin, compuestos por material aluvial compactado/consolidado. Estos valores de velocidad y espesor se muestran en la tabla VI-10.

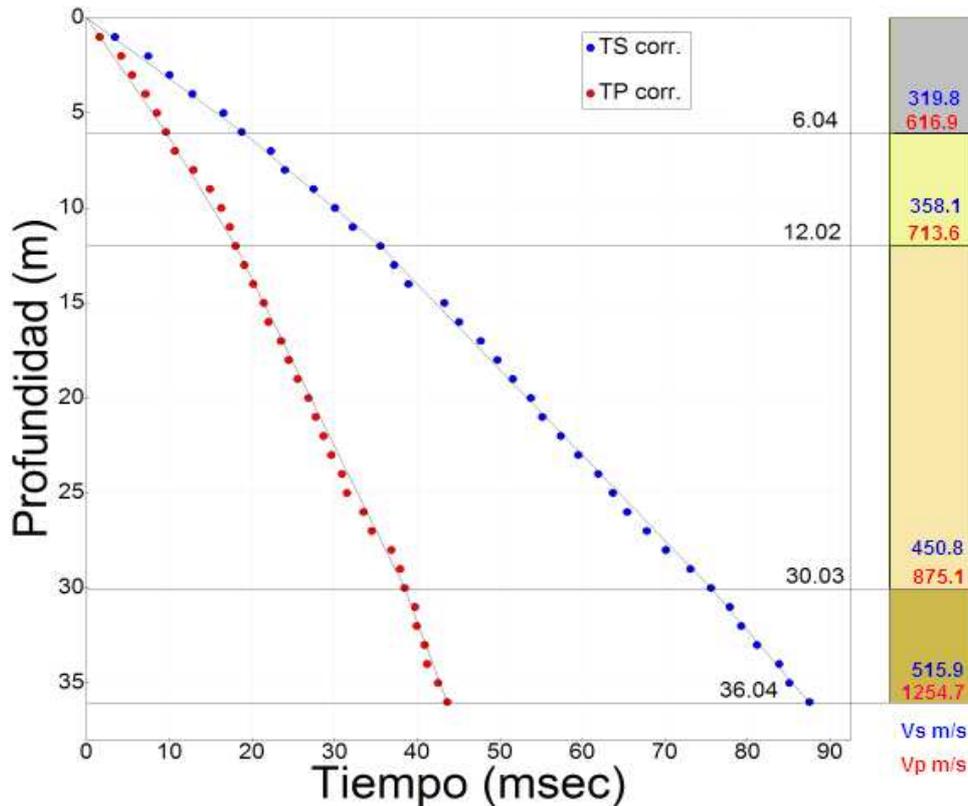


Figura VII-10. DH Estación Guatire 2. Modelo sismo - estratigráfico interpretado con valores promedio de velocidad para cada unidad sísmica.

Capa	Espesor m	Prof. m	Vp m/s	Vs m/s
1	6.4	6.4	616.9	319.8
2	5.62	12.02	713.6	358.1
3	18.1	30.03	875.1	450.8
4	----	>40.0	1254.7	515.9

Tabla VII-10. DH Estación Guatire-2 Prueba DownHole, modelo estratigráfico.

Sísmica Refracción por MicroTremores (ReMi)

En este modelo de ReMi se identifican 4 unidades sísmo estratigráficas (figura VI-11) con valores de Vs para cada unidad, se tiene que capa más superficial tiene un valor de 314,5 m/s correspondiente a material suelto de relleno y/o coluvión poco compactado y un espesor aproximado de 6,4 m. La capa siguiente corresponde a material aluvional ligeramente más compactado (coluvión) con un espesor aproximado de 5,8 m y una velocidad de 362 m/s. Seguidamente se encuentra un estrato cuya velocidad es de 459 m/s y un espesor de 17,8 m. Finalmente se encuentra un último estrato cuya velocidad es de 507 m/s. Estos valores de velocidad y espesor se muestran en la tabla VI-11.

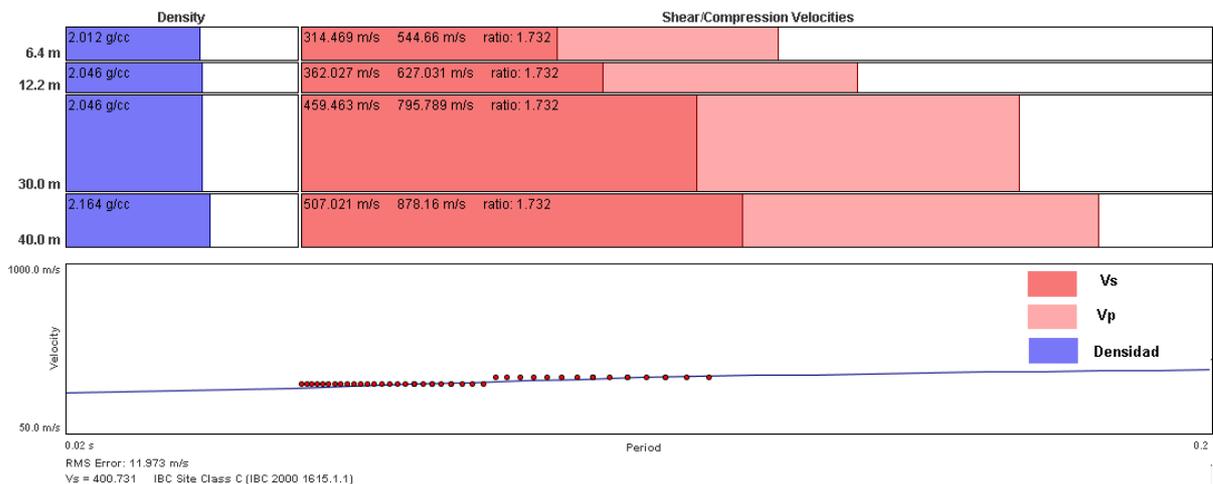


Figura VII-11. ReMi Estación Guatire 2. Modelo sísmo – estratigráfico, interpretado con valores de velocidad para cada unidad sísmica.

Capa	Espesor m	Prof. m	Vp m/s	Vs m/s
1	6.4	6.4	544.6	314.5
2	5.8	12.2	627	362
3	17.8	30	795.8	459.5
4	----	>40.0	878.2	507

Tabla VII-11. ReMi Estación Guatire 2. Refracción por micro tremores, modelo estratigráfico.

En la tabla VI-12 se observa un cuadro comparativo de velocidades de onda de corte para cada una de las capas. Las velocidades de onda de corte aumentan gradualmente con la profundidad, en esta estación las velocidades son mayores con respecto a las estaciones anteriores, esto se puede atribuir a la presencia de material más consolidado, también es importante considerar que la zona de Guatire 2 está ubicada geológicamente en el entorno del Pleistoceno que según estudios previos realizados por Pimentel (2010) indica que la rigidez del suelo es mayor en esta área, lo que concuerda con los valores obtenidos.

TABLA COMPARATIVA DE VS		
CAPA	Vs (DH)	Vs (ReMi)
1	319.8	314.5
2	358.1	362
3	450.8	459.5
4	515.9	507

Tabla VII-12. Comparación entre Velocidades obtenidas con DH y ReMi en la estación Guatire 2.

A continuación se muestra en la figura VI-12, la correlación metro a metro de velocidades de ondas de corte para cada uno de los métodos (36 metros), y en la tabla del lado izquierdo se observan las velocidades interválicas de ondas P y ondas S obtenidas con el método DownHole, cabe destacar que las velocidades mostradas en la correlación, son provenientes del modelo sismo – estratigráfico

(figura VI-11) ReMi y las velocidades obtenías con el método DH. La relación entre ambas velocidades es similar para cada estrato.

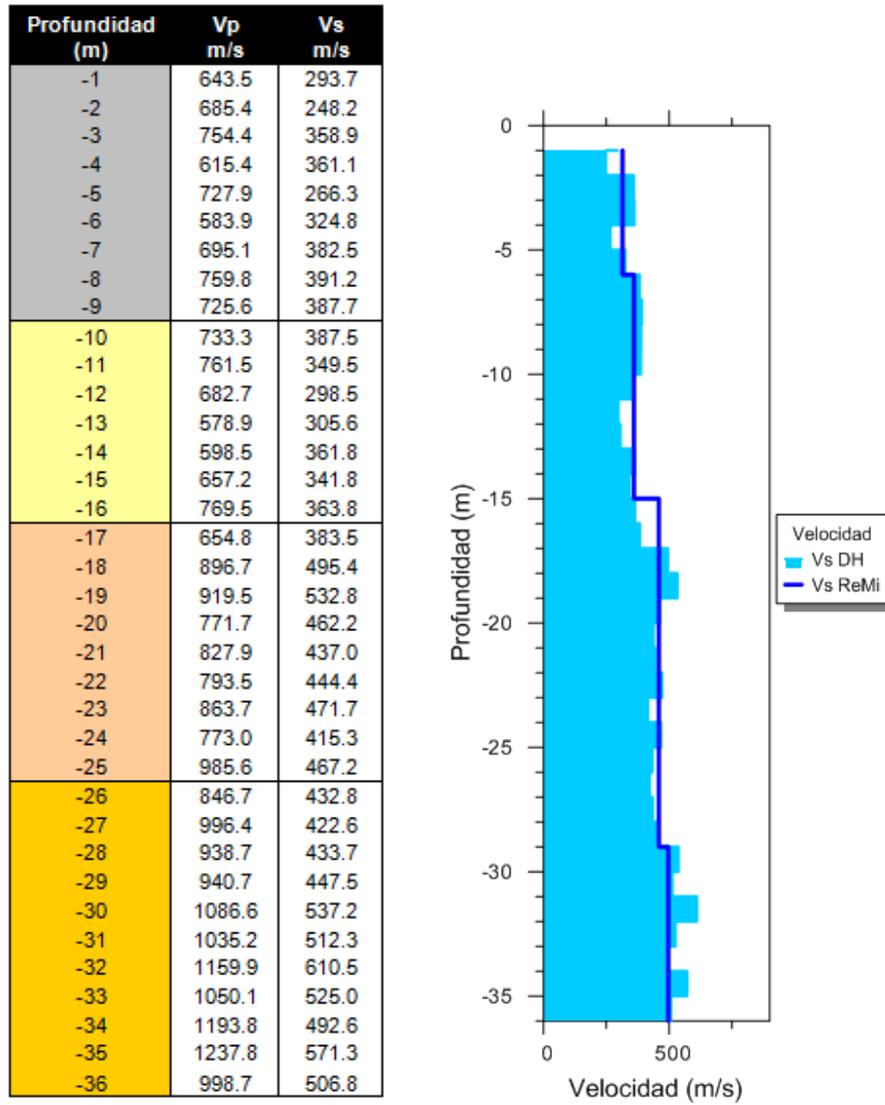


Figura VII-12. Estación Guatire 2. Correlación entre Velocidades obtenidas con DH y ReMi.

Parámetros Dinámicos y Estáticos

Mediante el uso combinado de datos geotécnicos como las densidades ρ (datos presentados por la contratista Odebrecht, tabla VI-13):

Profundidad (m)	Guarenas 1 Densidad (Kg/m ³)	Guarenas 2 Densidad (Kg/m ³)	Guatire 1 Densidad (Kg/m ³)	Guatire 2 Densidad (Kg/m ³)
5	2165	2097	2198	2130
7	2165	2097	2178	2130
10	2150	2052	2158	2200
15	2070	2236	2205	2450
20	2170	2172	2050	2700

Tabla VII-13. Densidades obtenidas con estudios geotécnicos.

Se calcularon los siguientes parámetros dinámicos:

- el módulo de deformación al corte **Go** o **Gmax** (rigidez),
- el módulo de Young – elasticidad o deformación dinámica **E**,
- el módulo de compresibilidad volumétrico **K(Ev)**, y
- **Estat**, Modulo de deformación Estático, Este parámetro es útil para la evaluación de asentamientos de zapatas en suelos arenosos y aluviales.

Los parámetros elásticos fueron calculados en el sistema *mks* en dos modalidades; una relativa a las velocidades interválicas obtenidas en los diferentes niveles de medición en el pozo y una relativa al modelo sismo estratigráfico promedio por unidades sísmicas.

Para visualizar mejor la variabilidad de la rigidez (G) en profundidad, se elaboraron mapas de isoprofundidad a los 5m, 7m, 10m, 15m, y 20m para cada una de las estaciones generadas a partir de los modelos ReMi.

Estación Guarenas 1

Parámetros obtenidos con el método DownHole

A partir de los valores de velocidad de ondas p y ondas s medidos se obtienen los valores de los parámetros elásticos, presentados tanto por capas (tabla VI-14) como metro a metro (tabla VI-15). En la figura VI-13 se indica el comportamiento en profundidad de estos parámetros metro a metro (valores interválicos) observándose una disminución en la segunda capa de G_{max} , E , $K(Ev)$ y E_{est} , posiblemente asociado a la presencia de agua. Los valores de coeficiente de Poisson para las dos primeras capas se encuentran en el rango de secuencias aluviales (0,35 hasta 0,45) según Cetraro (2007), seguido de dos capas más compactadas (0,3 y 0,33 respectivamente).

Espesor (m)	V_p/V_s	Poisson	G_{max}	E	K (Ev)	Eest
		ν	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
9	1.9	0.38	145.6	378.6	315.4	88.7
5	2	0.35	109.6	293.3	303	65.3
7	1.9	0.3	347.9	901.5	735.4	195
----	2	0.33	613.3	1636	1636	294

Tabla VII-14. DH Estación Guarenas 1. Datos de los estratos sísmicos por capa. Velocidades y constantes elásticas promedio.

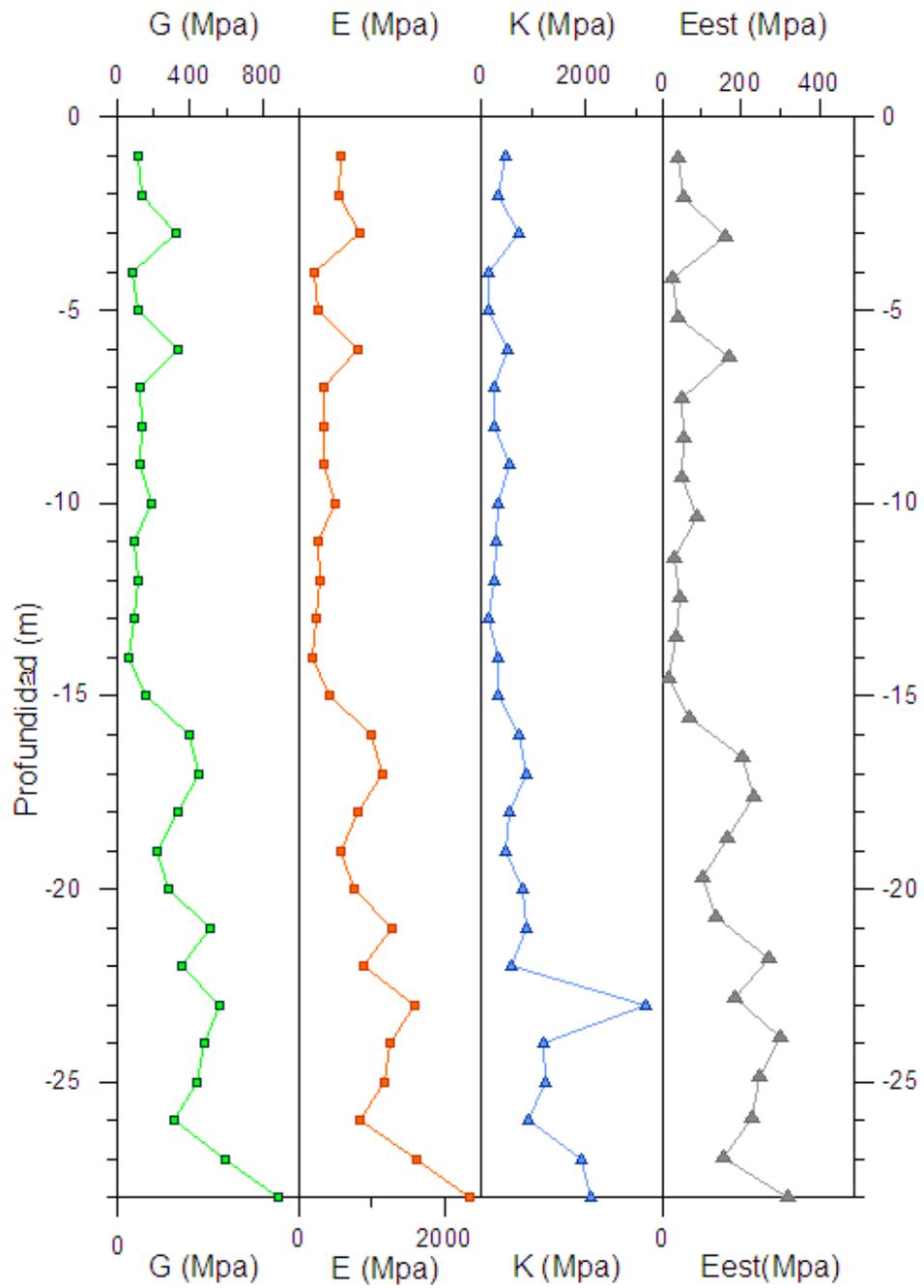


Figura VII-13. DH Guarenas 1. Parámetros elásticos intervállicos.

Profundidad (m)	Gmax Mpa	E Mpa	K(Ev) Mpa	E (est) (Mpa)
-1	110.1	573	509.5	59.5
-2	134	554.8	334.5	72.4
-3	317.9	838.7	772.6	171.7
-4	85	217.7	165	45.9
-5	110.1	267.4	155.7	59.5
-6	332.1	820.3	515.8	179.3
-7	128.8	330.2	252.3	69.6
-8	137.6	351.8	264.9	74.3
-9	122.5	342.4	555.3	66.2
-10	192.4	486	342	103.9
-11	96.21	261.3	306.9	52.0
-12	113.9	296.8	250.4	61.5
-13	98.3	244.9	160.6	53.1
-14	65.7	185	337.6	35.5
-15	159.2	412.9	338.9	86.0
-16	392.2	1000.7	743.6	211.8
-17	445.5	1149.2	911.9	240.6
-18	328	821	551	177.1
-19	213.8	562.1	505.8	115.5
-20	279.4	752.9	822.7	150.9
-21	510.4	1286.8	896.4	275.6
-22	358.2	893.6	589.2	193.4
-23	562.9	1597.2	3269.4	304.0
-24	474.1	1262.3	1245.4	256.0
-25	436.9	1177.3	1282	235.9
-26	310.2	839.4	952.2	167.5
-27	595.3	1627.3	1982.3	321.5
-28	888	2346.9	2191.2	479.5

Tabla VII-15. Estación Guarenas 1. Valores de Velocidad de ondas s y p y parámetros elásticos interválicos.

Modelo de Rigidez G obtenido con el método ReMi

En la tabla VI-16 se muestran los valores de los modelos calculados para el módulo de rigidez G con la velocidad de onda de corte obtenidas con el método ReMi para las diferentes profundidades (5, 7, 10, 15, 20 metros), que corresponden a los mapas de isoprofundidad que se muestran a continuación.

Estacion	X(UTM)	Y(UTM)	G7m(Mpa)	G10m(Mpa)	G15m(MPa)	G20m(MPa)
GUARENAS 1	761018	1158699	165.9	131.0	114.7	261.1
	761049	1158710	163.6	131.0	114.8	261.1
	761079	1158721	163.6	131.5	126.6	340.3
	761109	1158732	163.6	131.5	126.6	340.3
	761139	1158743	165.8	86.0	279.7	293.2
	761168	1158754	166.5	90.6	274.6	280.8
	761198	1158765	173.5	100.2	274.7	288.0
	761228	1158776	170.7	118.1	276.4	288.3
	761258	1158786	176.5	128.8	288.9	302.9
	761017	1158764	135.4	96.2	217.8	228.4
	761048	1158774	156.1	103.0	220.4	231.0
	761078	1158785	156.1	117.3	244.5	256.3
	761108	1158796	154.9	114.5	110.3	247.0
	761139	1158807	154.9	114.5	110.3	246.9
	761168	1158818	195.6	134.5	278.4	279.0
	761198	1158829	182.7	134.5	275.2	291.8
	761228	1158839	187.4	122.0	285.4	299.2
	761258	1158850	192.0	119.1	227.9	238.9
	761012	1158730	192.0	133.5	227.9	238.9
	761043	1158742	213.9	111.0	314.2	329.4
	761073	1158752	217.7	108.3	331.2	347.2
	761102	1158763	158.2	111.9	293.7	307.9
	761132	1158773	137.4	92.8	299.5	224.3
	761162	1158784	156.0	110.0	205.8	215.7
	761192	1158795	156.0	125.7	238.0	249.5
	761223	1158805	125.6	143.6	298.1	312.5
761253	1158816	113.4	127.6	181.2	190.1	

Tabla VII-16. Estación Guarenas 1. Valores de Rigidez para 5, 7, 10, 15 y 20 metros.

A partir de los valores de velocidad de ondas medidos se obtiene el módulo de rigidez (G) (ver marco teórico) que depende solo de V_s . Se generaron mapas de isoprofundidad (Ver metodología) para 5, 7, 10, 15, 20 metros. En los mapas de isoprofundidad de las figuras VI-14 a la VI-18, se detalla la variación del valor de rigidez con respecto a la profundidad de la estación Guarenas 1. Se observa claramente como la rigidez sufre un aumento con la profundidad hasta los 7m de profundidad, (figura VI-15). A partir de allí se produce una disminución del valor de G (desciende desde los 150Mpa a los 7m de profundidad hasta los 100Mpa a

los 10m), para luego aumentar nuevamente de manera gradual hasta los 20m donde se presentan los mayores valores de rigidez hacia el Sur de la ruta (G= 340Mpa).

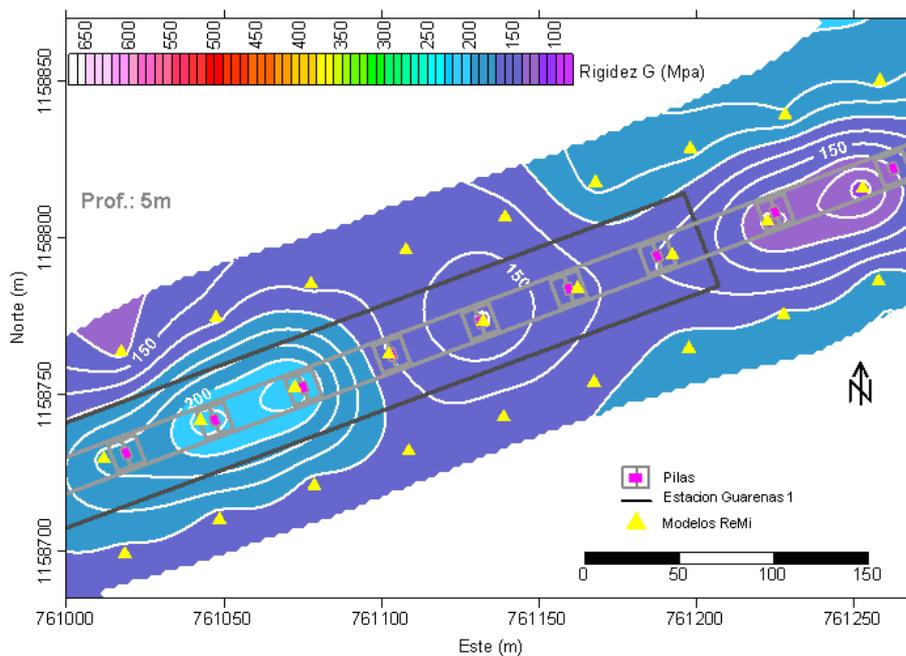


Figura VII-14. Estación Guareñas 1. Mapa de Rigidez (G) a los 5m de profundidad.

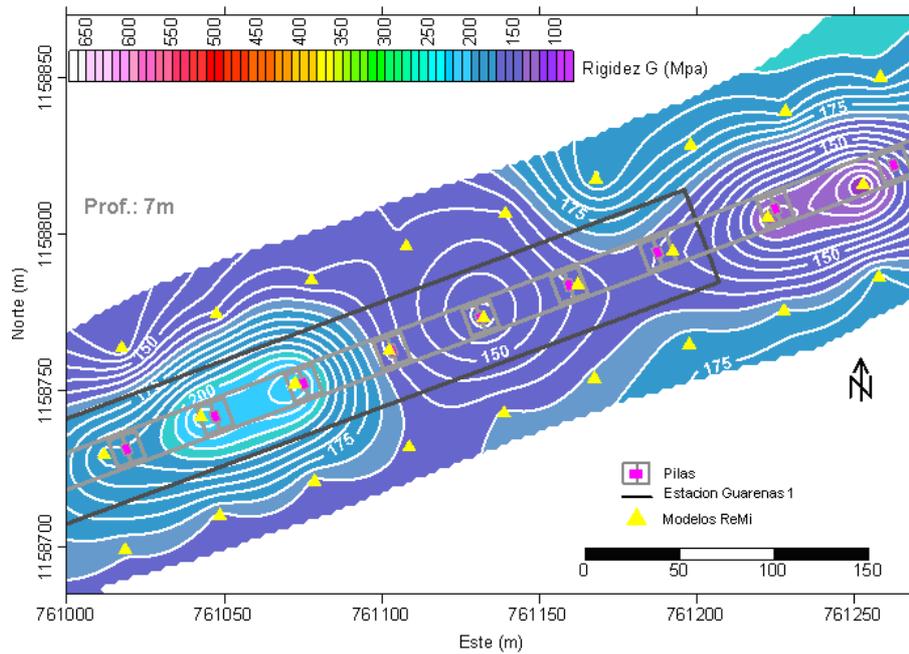


Figura VII-15. Estación Guareñas 1. Mapa de Rigidez (G) a los 7m de profundidad.

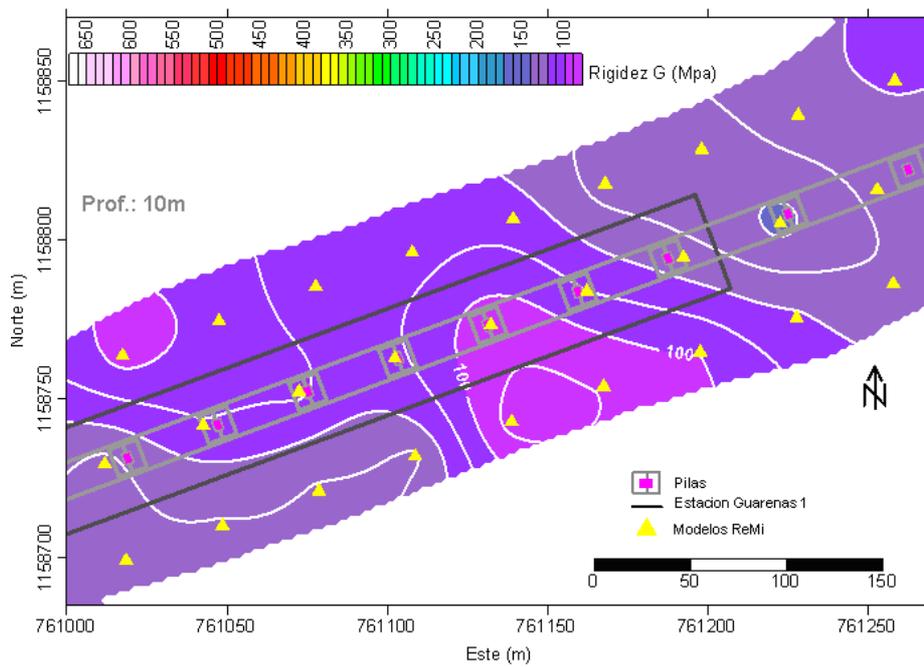


Figura VII-16. Estación Guareñas 1. Mapa de Rigidez (G) a los 10m de profundidad.

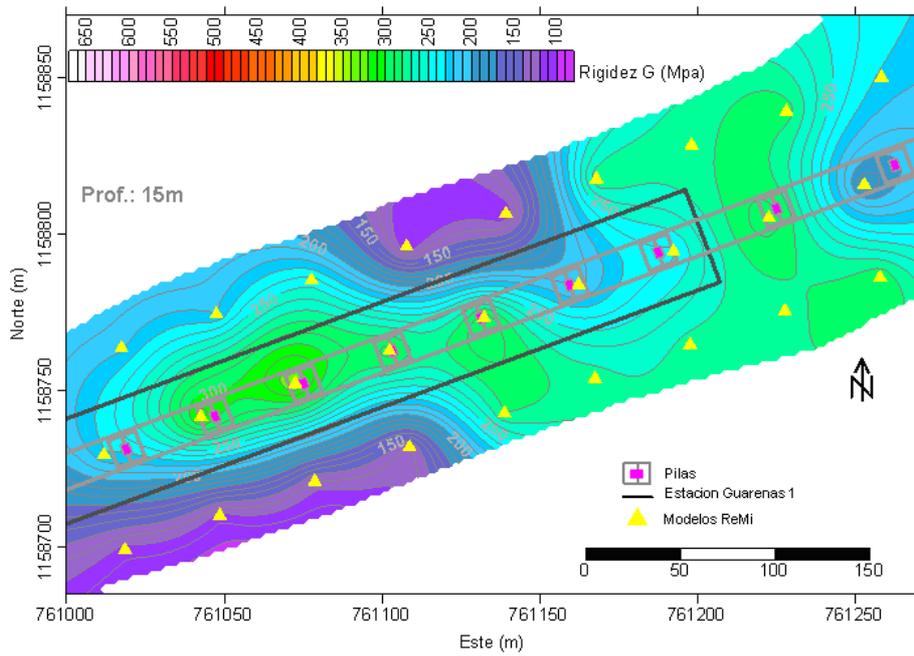


Figura VII-17. Estación Guareñas 1. Mapas de Rigidez (G) a los 15m de profundidad.

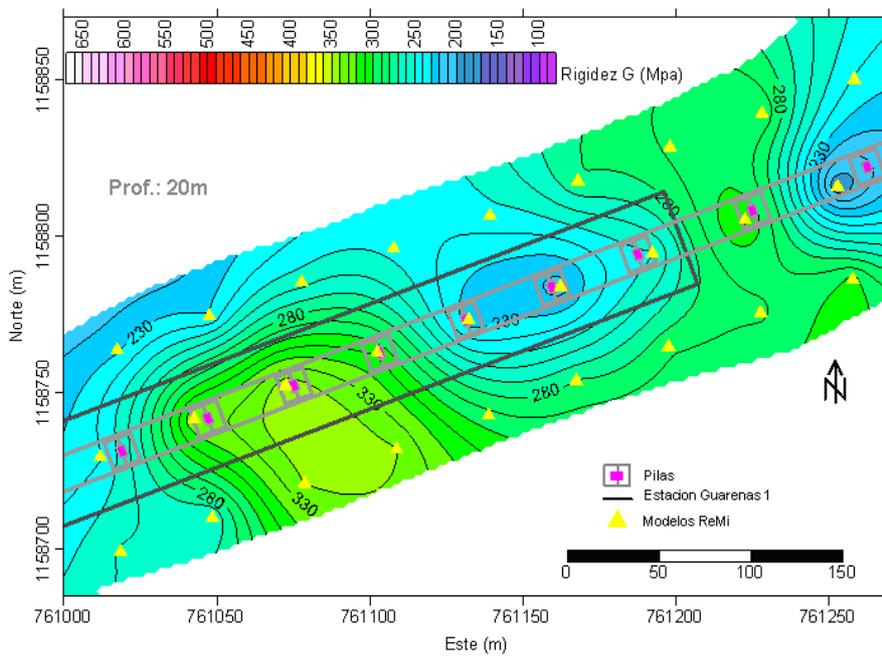


Figura VII-18. Estación Guareñas 1. Mapa de Rigidez (G) a los 20m de profundidad.

En resumen la variación del Módulo de Rigidez con la profundidad se observa en la figura VII-19, a los 10 metros se observa una disminución ocasionada por la presencia de una capa con inversión de velocidad, a partir de los 10 metros se incrementan estos valores hasta los 20 metros.

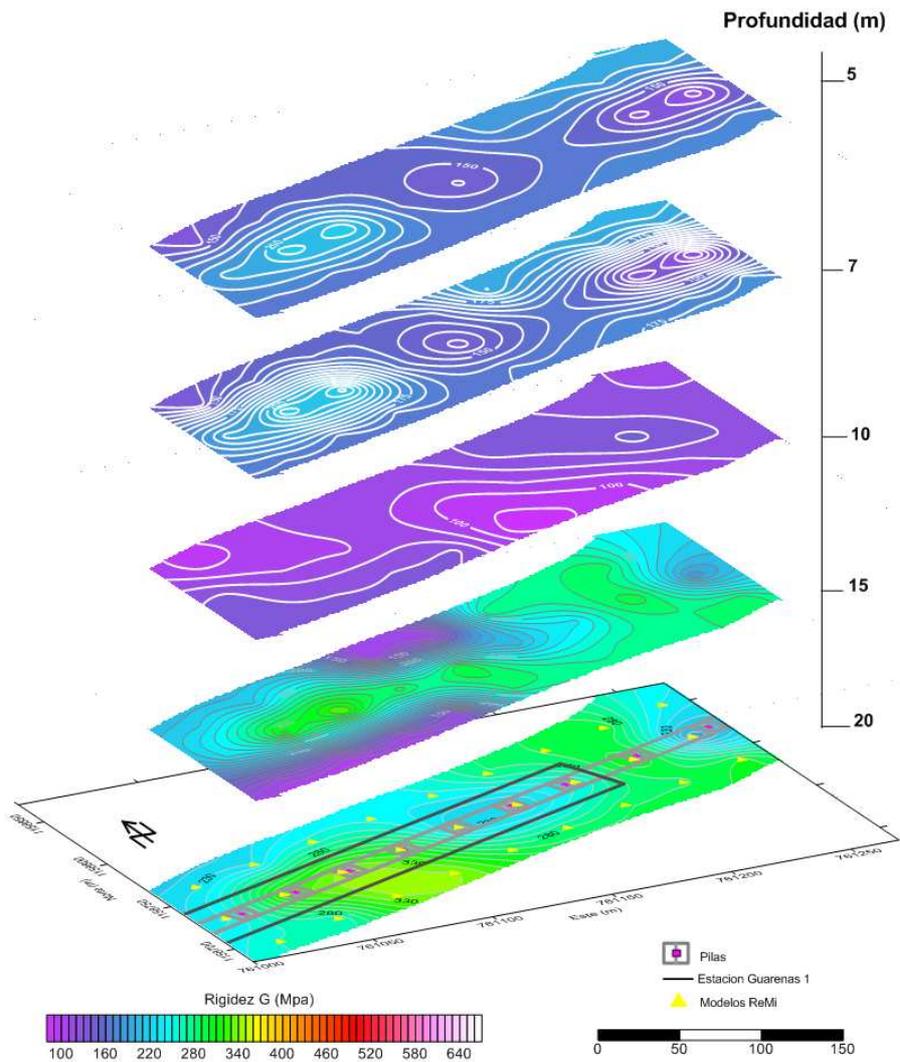


Figura VII-19. Estación Guarenas 1. Variación de Rigidez G con la profundidad.

Estación Guarenas 2

Parámetros obtenidos con el método DownHole

Se muestran los valores de los parámetros elásticos, presentados por capas en la tabla VI-17, en la figura VI-19 se observa el comportamiento en profundidad de estos parámetros metro a metro (valores interválicos). En este caso los valores de Gmax, E, K y Eest aumentan con la profundidad. En la tabla VI-18 se observan los correspondientes a la figura. Los valores de elasticidad o coeficiente de Poisson (0,32 hasta 0,37) están en el rango asociado a secuencias o sedimentos aluviales.

Espesor (m)	Vp/Vs	Poisson v	Gmax Mpa	E Mpa	K (Ev) Mpa	Eest Mpa
9	1.9	0.36	110.3	294.4	296.7	72.1
7	2	0.34	178.8	477.3	482.3	119
9	1.9	0.37	255.7	702	918.7	149
----	2	0.32	764.9	1846	1050	408

Tabla VII-17. DH Estación Guarenas 2. Datos de los estratos sísmicos por capa. Velocidades y constantes elásticas promedio.

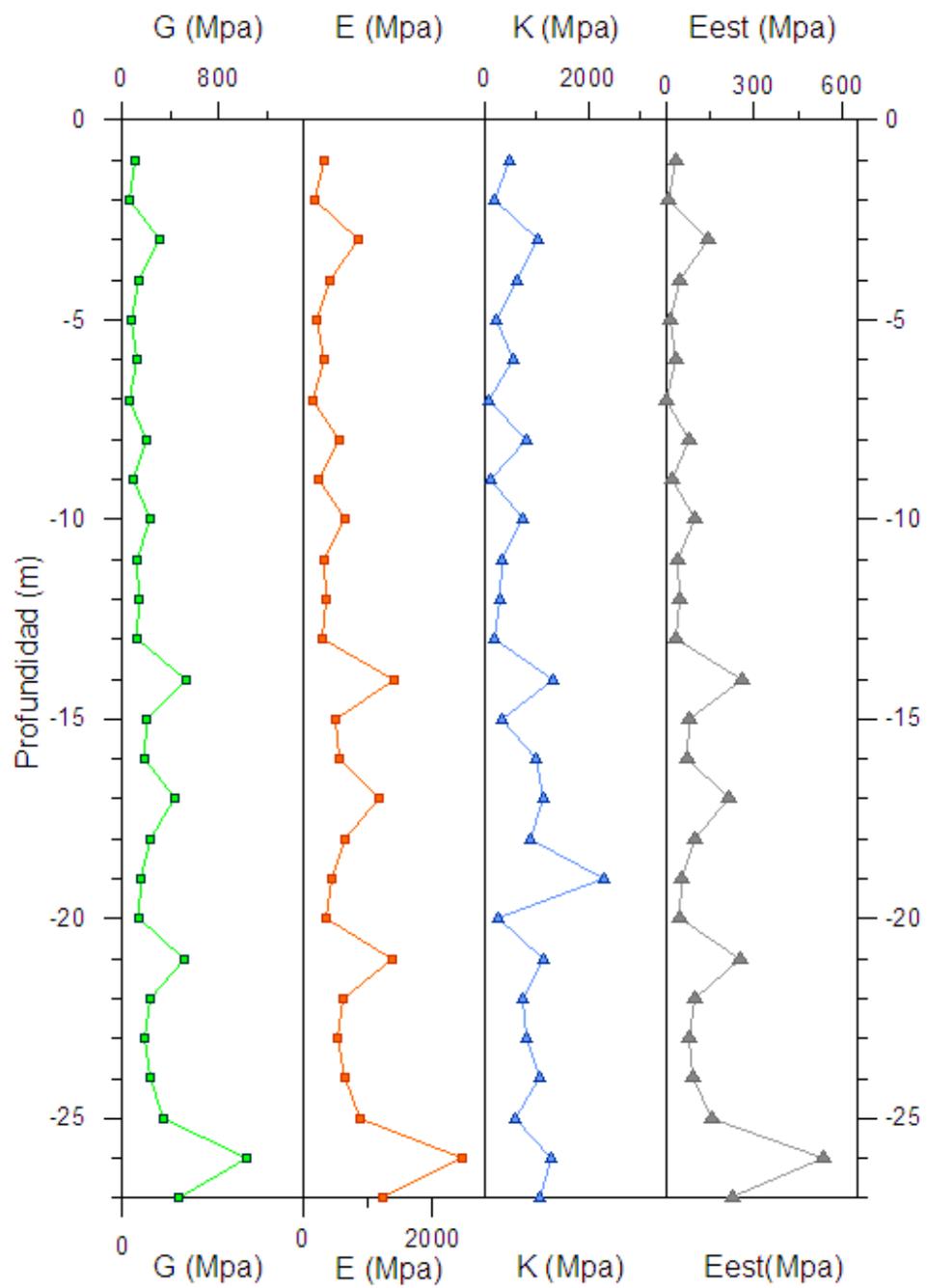


Figura VII-20. DH Guarenas 2. Parámetros elásticos interválicos.

Profundidad (m)	Gmax Mpa	E Mpa	K(Ev) Mpa	Eest _{0.1%} (Mpa)
-1	114.4	318.4	489.4	61.8
-2	66.7	177.8	177.3	36.0
-3	315.4	861.2	1066.7	170.3
-4	144.3	402.5	637.5	77.9
-5	77.8	210.3	235.0	42.0
-6	120.5	337.3	558.5	65.1
-7	62.4	148.8	80.5	33.7
-8	203.4	564.8	842.8	109.8
-9	96.9	234.4	134.7	52.3
-10	233.4	634.7	755.2	126.0
-11	123.7	330.7	337.8	66.8
-12	137.0	356.0	294.8	74.0
-13	121.5	299.4	186.3	65.6
-14	528.8	1405.6	1368.8	285.6
-15	199.7	503.2	349.0	107.9
-16	192.8	544.7	1036.9	104.1
-17	442.1	1179.0	1179.3	238.7
-18	235.6	650.3	903.3	127.2
-19	151.9	446.3	2386.1	82.0
-20	136.0	349.2	269.0	73.4
-21	521.8	1362.1	1164.6	281.8
-22	229.7	624.1	736.6	124.0
-23	194.2	540.5	829.1	104.9
-24	227.4	638.1	1096.5	122.8
-25	345.1	869.3	602.7	186.3
-26	1038.3	2467.3	1318.9	560.7
-27	473.8	1240.0	1079.8	255.8

Tabla VII-18. Estación Guarenas 2. Valores de Velocidad de ondas s y p y parámetros elásticos interválicos.

Modelo de Rigidez G obtenido con el método ReMi

En la tabla VI-19 se muestran los valores de los modelos calculados para el módulo de rigidez G con la velocidad de onda de corte obtenidas con el método ReMi para las diferentes profundidades (5, 7, 10, 15, 20 metros), que corresponden a los mapas de isoprofundidad que se muestran a continuación.

Estacion	X(UTM)	Y(UTM)	G5m(MPa)	G7m(Mpa)	G10m(Mpa)	G15m(MPa)	G20m(MPa)
Guarenas 2	762928	1158505	142.0	132.0	157.8	377.2	366.4
	762960	1158507	143.0	141.5	178.3	327.8	318.4
	762991	1158510	143.0	143.0	191.9	327.8	318.4
	763023	1158512	141.8	140.3	188.3	339.9	330.4
	763055	1158514	152.0	152.0	183.9	315.9	306.9
	763087	1158517	148.0	146.5	213.6	331.8	322.3
	763119	1158519	144.3	144.3	234.0	298.7	290.2
	763151	1158521	155.9	154.3	207.4	304.3	295.7
	763183	1158523	144.3	144.3	210.5	293.2	284.8
	762920	1158542	139.2	137.7	136.2	203.5	379.0
	762952	1158543	122.2	122.2	119.6	278.3	458.6
	762984	1158543	122.2	120.9	119.6	224.4	362.4
	763016	1158544	117.6	117.6	165.9	137.9	290.2
	763048	1158545	139.2	137.7	182.5	198.8	282.9
	763080	1158545	143.5	152.0	195.5	295.0	286.5
	763112	1158546	144.3	142.8	211.0	293.2	284.6
	763144	1158546	143.0	143.0	205.9	345.9	336.0
	763176	1158547	143.0	141.5	205.9	335.7	326.1
	762931	1158525	157.9	156.2	184.7	315.4	306.4
	762963	1158526	157.9	157.9	184.7	273.9	266.1
762995	1158527	161.8	160.1	201.4	313.4	304.5	
763027	1158529	121.9	121.9	175.2	267.1	259.4	
763057	1158529	134.5	133.1	175.2	243.5	236.5	
763089	1158530	134.5	134.5	175.2	232.1	225.5	
763122	1158532	135.1	133.7	176.4	213.2	207.1	
763154	1158533	133.1	133.1	177.5	354.0	343.9	
763187	1158534	124.4	123.1	184.2	296.1	287.6	

Tabla VII-19. Estación Guarenas 2. Valores de Rigidez para 5, 7, 10, 15 y 20 metros.

En los mapas de las figuras VI-17 a la VI-21 se detalla la variación de la Rigidez con respecto a la profundidad de la estación Guarenas 2. Se puede observar cómo se mantiene estable hasta los 10m de profundidad promediando un valor de 150Mpa a los 5m, 7m y 10m, (figuras VI-17, 18, 19). Luego se produce un aumento hasta llegar a los valores mínimos y máximos de 250Mpa y 340Mpa respectivamente a los 15m. Finalmente a los 20m de profundidad se observa que aumenta la rigidez ($G=400\text{Mpa}$), hacia el Este de la ruta, promediando 350Mpa en toda la zona.

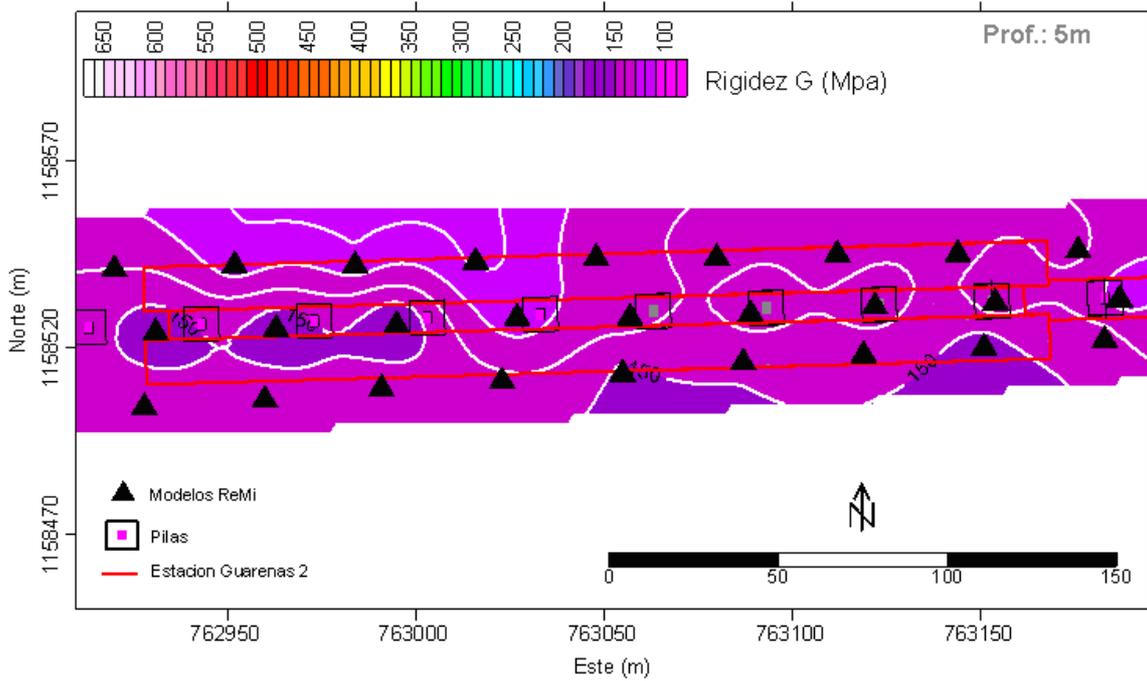


Figura VII-21. Estación Guareñas 2. Mapa de Rigidez (G) a los 5m de profundidad.

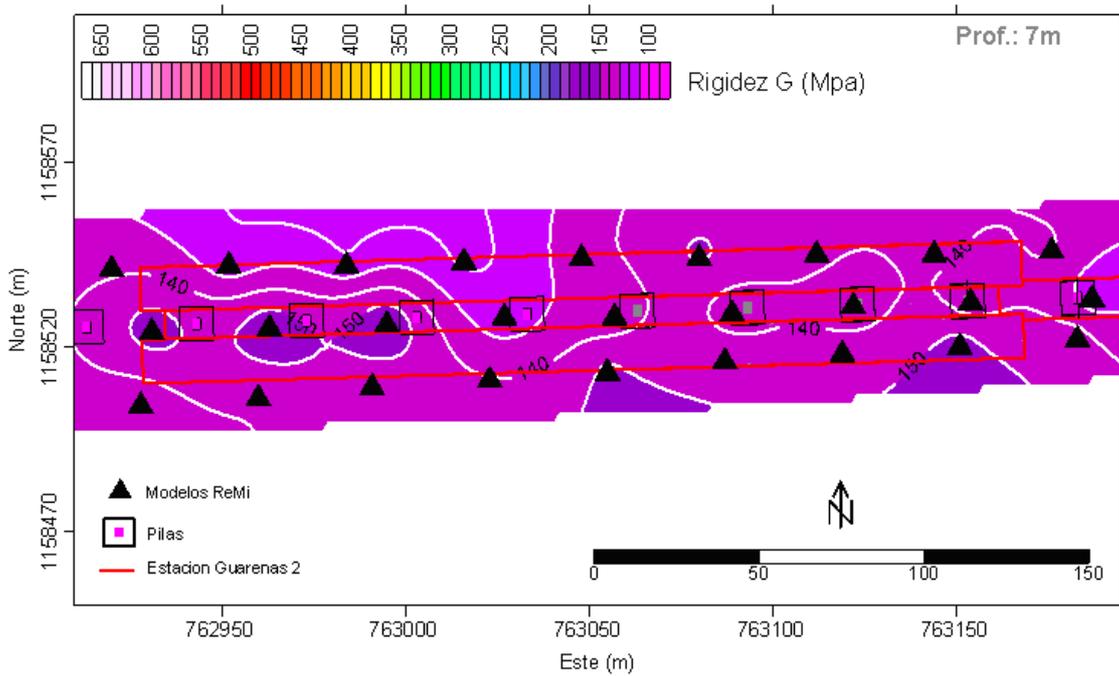


Figura VII-22. Estación Guareñas 2. Mapa de Rigidez (G) a los 7m de profundidad

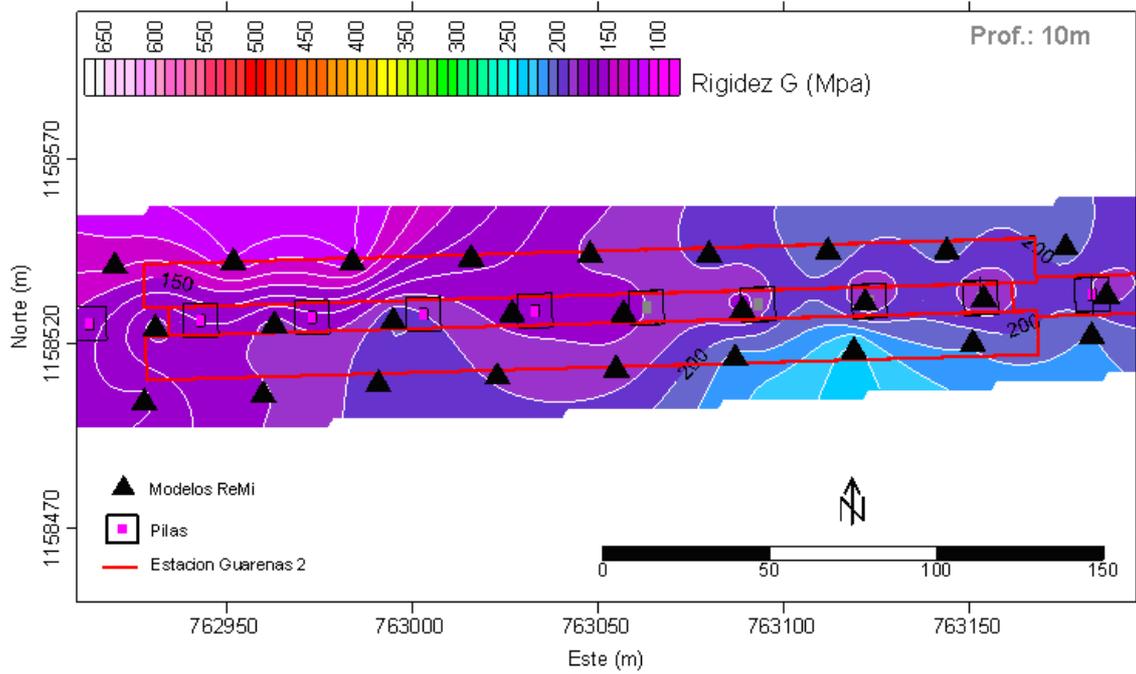


Figura VII-23. Estación Guarenas 2. Mapa de Rigidez (G) a los 10m de profundidad.

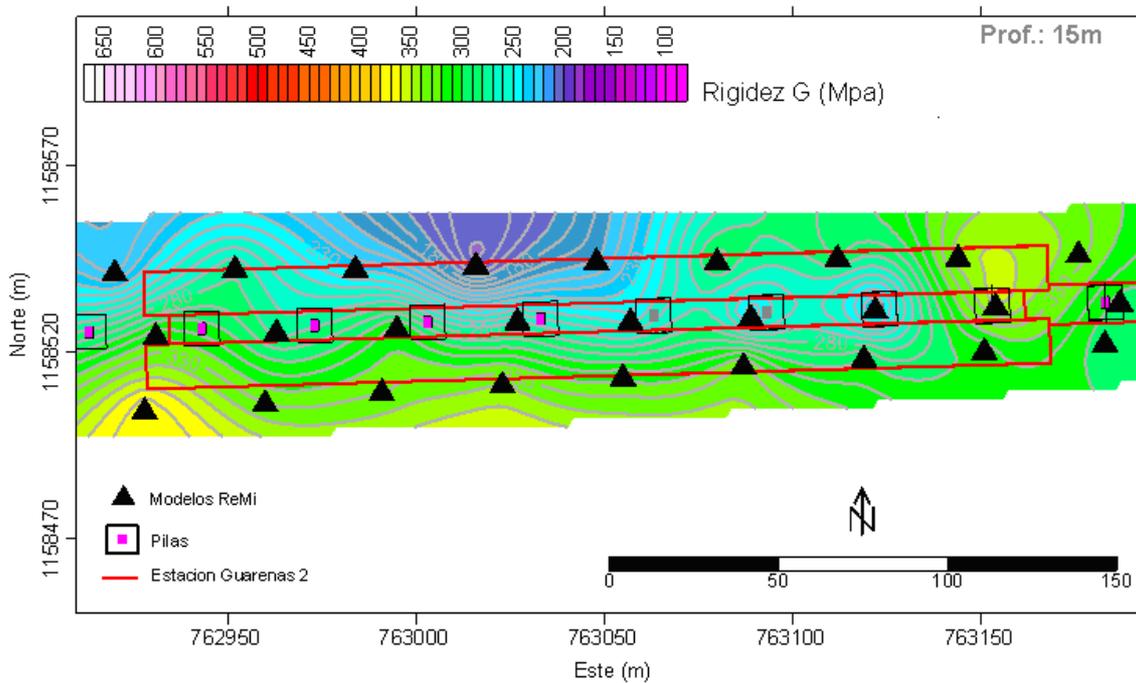


Figura VII-24. Estación Guarenas 2. Mapa de Rigidez (G) a los 15m de profundidad

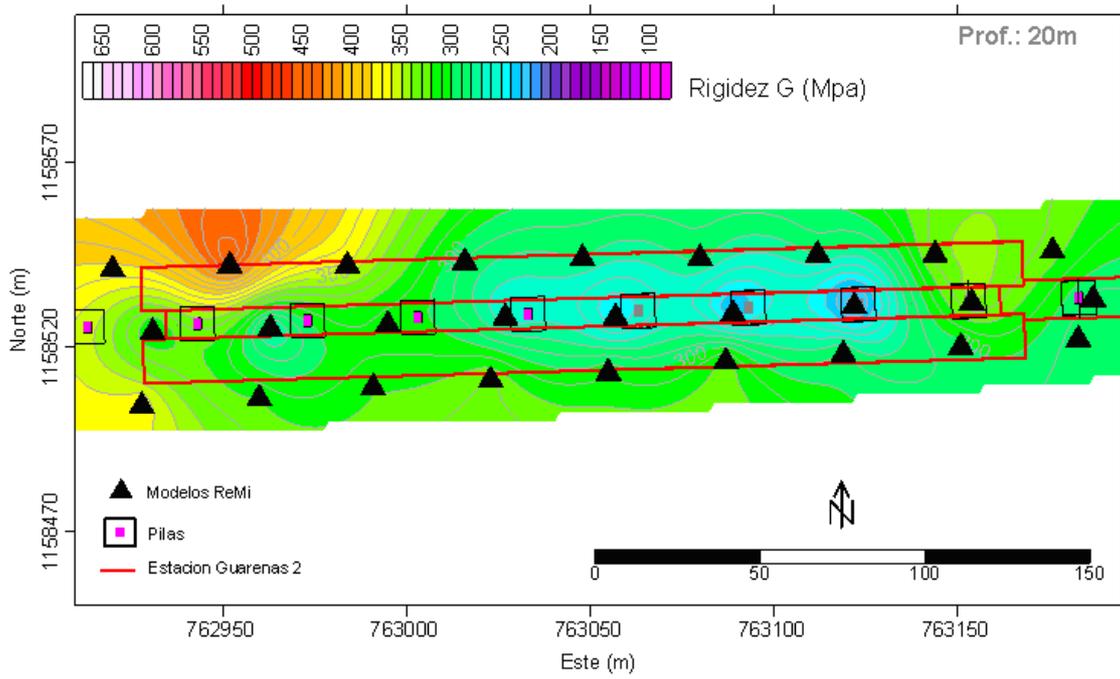


Figura VII-25. Estación Guarenas 2. Mapa de Rigidez (G) a los 20m de profundidad.

En resumen la variación del Módulo de Rigidez con la profundidad se observa en la figura VII-26, los valores aumentan progresivamente con la profundidad hasta los 20 metros.

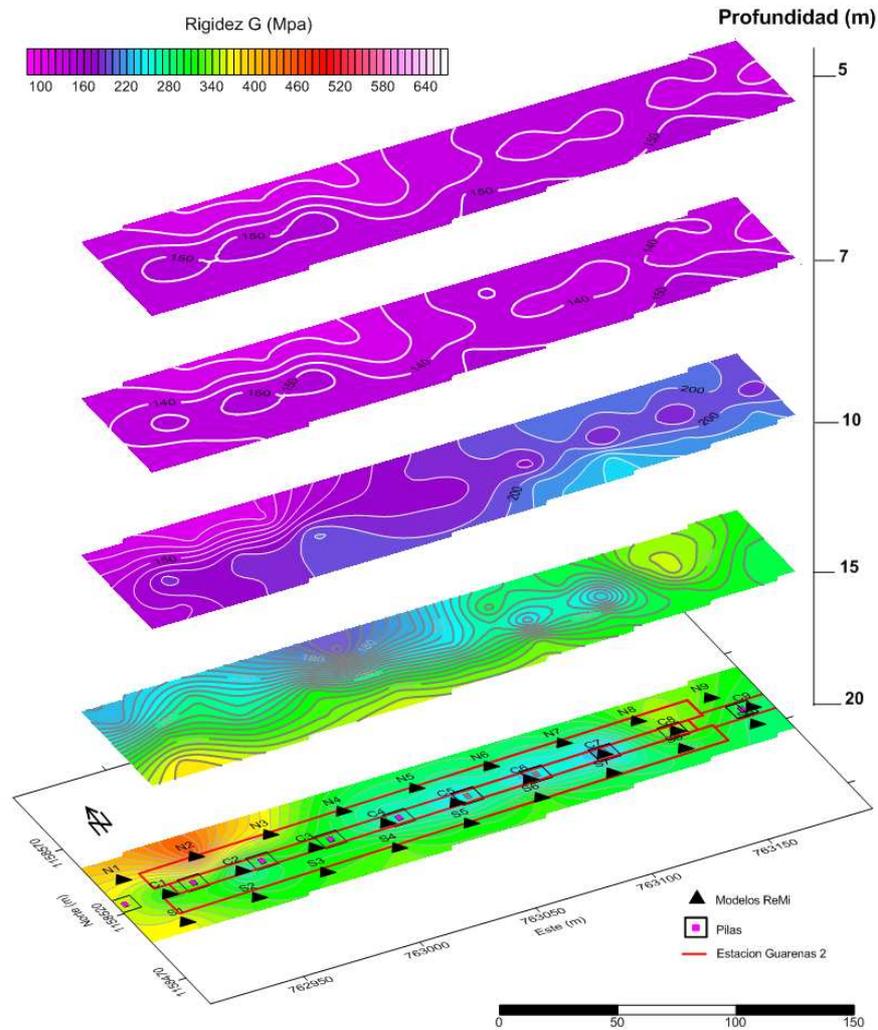


Figura VII-26. Estación Guarenas 2. Variación de Rigidez G con la profundidad.

Haciendo un análisis general para las dos primeras estaciones, se tiene que para los valores del coeficiente de Poisson están en el rango de los característicos a sedimento aluvional (0,35 – 0,45) según Cetraro (2007), siendo perfectamente coherentes con los estudios hechos por Rojas (2008), donde obtuvo estos mismos resultados en la ciudad de Caracas, a niveles superficiales se tienen sedimentos holocénicos cercanos a pie de la montaña tal como Guarenas – Guatire. En

cuanto a los valores de Rigidez son correspondientes a sedimentos (arenas, arcillas), se estudia este parámetro a esas profundidades para dar un diagnóstico del comportamiento dinámico del suelo y así establecer el tipo de pilote y a que profundidad tiene mayor estabilidad.

Estación Guatire 1

Parámetros obtenidos con el método DownHole

Se muestran los valores de los parámetros elásticos, presentados por capas en la tabla VI-20, en la figura VI-22 se observa el comportamiento en profundidad de estos parámetros metro a metro (valores interválicos), con una disminución de G_{max} , E , K y E_{est} para la tercera capa, asociado a la presencia de una capa saturada de agua. En la tabla VI-21 se muestran los correspondientes interválicos. Los valores a nivel superficial (0,35 hasta 0,37) corresponden a sedimentos aluviales, seguido de dos capas con coeficiente de Poisson, que indican material más compactado posiblemente estos resultados estén asociados a sedimentos de edad pleistocénica (arcillas pleistocénicas).

Espesor (m)	V_p/V_s	Poisson	G_{max}	E	$K (E_v)$	E_{est}
		ν	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
9	2.2	0.37	131.9	361.4	461.7	80.9
7	2.1	0.35	219.8	594.9	674.8	173
9	1.9	0.29	195.8	508	417.4	108
----	1.9	0.3	302.7	786.6	653.5	408

Tabla VII-20. DH Estación Guatire 1. Datos de los estratos sísmicos por capa. Velocidades y constantes elásticas promedio.

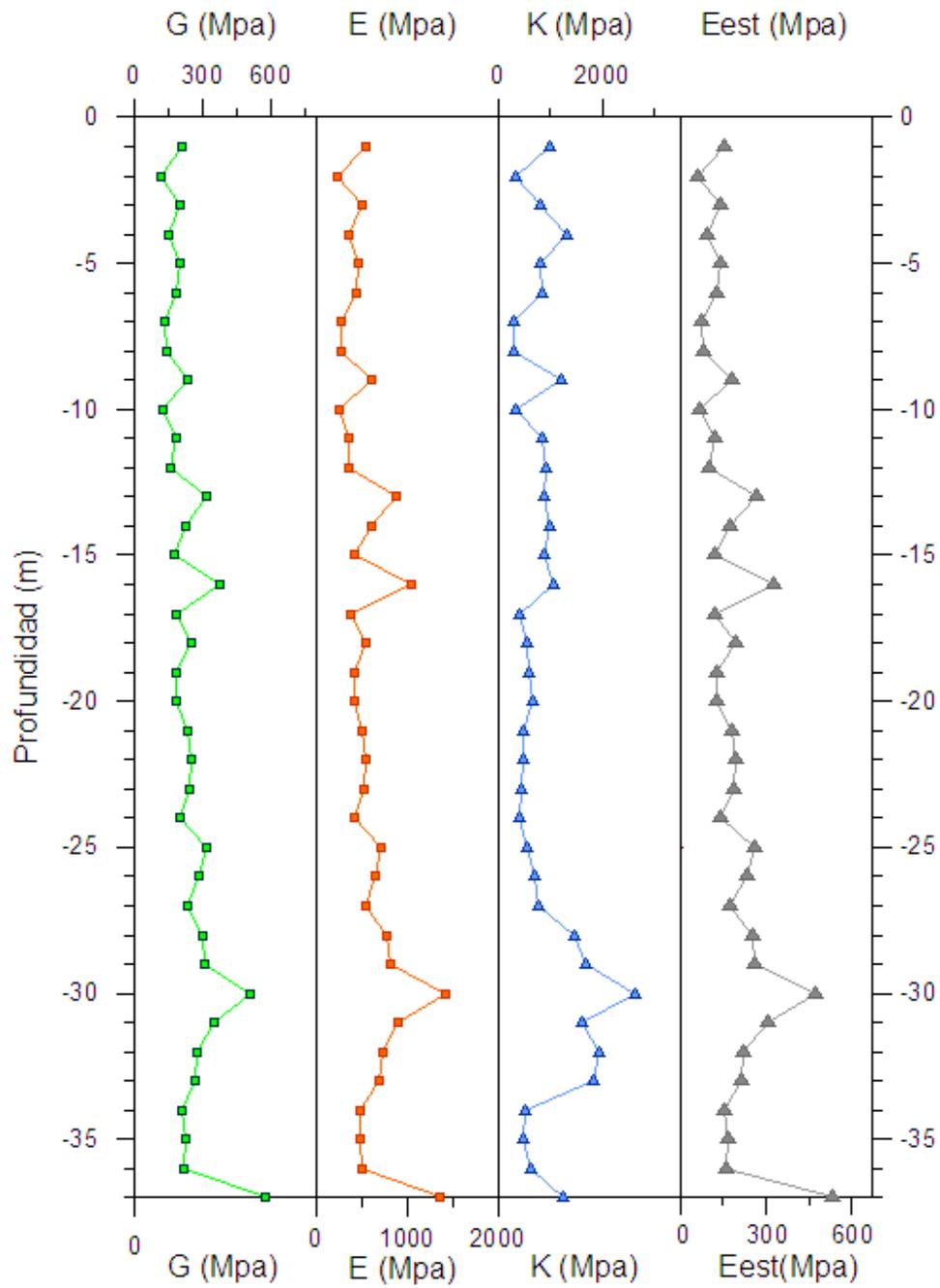


Figura VII-27. DH Guatire 1. Parámetros elásticos interválicos.

Profundidad (m)	Gmax Mpa	E Mpa	K(Ev) Mpa	Eest _{0,1%} (Mpa)
-1	188.2	534.2	572.3	101.6
-2	91.0	236.6	197.0	49.2
-3	175.7	502.4	469.5	94.9
-4	124.5	364.9	758.6	67.3
-5	173.8	463.6	465.7	93.8
-6	160.7	434.6	490.0	86.8
-7	107.9	267.2	170.1	58.3
-8	113.0	275.3	163.0	61.0
-9	213.0	611.4	682.6	115.0
-10	97.8	250.6	190.6	52.8
-11	156.8	358.4	485.6	84.7
-12	132.3	366.3	529.2	71.4
-13	304.6	878.2	498.7	164.5
-14	206.5	603.6	569.7	111.5
-15	155.3	422.2	501.0	83.8
-16	364.3	1043.8	610.9	196.7
-17	156.0	381.4	229.0	84.2
-18	230.0	552.7	308.5	124.2
-19	160.6	416.7	342.4	86.7
-20	158.4	417.5	381.5	85.5
-21	216.3	509.8	264.4	116.8
-22	231.1	544.6	266.8	124.8
-23	222.4	520.0	262.0	120.1
-24	175.0	417.1	225.5	94.5
-25	297.1	708.2	310.5	160.5
-26	264.8	647.9	390.5	143.0
-27	209.0	542.6	448.3	112.8
-28	286.8	771.2	827.4	154.8
-29	296.4	806.2	961.1	160.0
-30	508.5	1412.7	1502.3	274.6
-31	340.2	908.4	918.1	183.7
-32	253.3	736.9	1108.3	136.8
-33	249.1	692.2	1045.4	134.5
-34	190.7	471.2	296.5	103.0
-35	201.6	483.2	267.0	108.9
-36	193.1	492.4	364.4	104.3
-37	571.9	1353.4	712.3	308.8

Tabla VII-21. Estación Guatire 1. Valores de Velocidad de ondas s y p y parámetros elásticos.

Modelo de Rigidez G obtenido con el método ReMi

En la tabla VI-22 se muestran los valores de los modelos calculados para el módulo de rigidez G con la velocidad de onda de corte obtenidas con el método

ReMi para las diferentes profundidades (5, 7, 10, 15, 20 metros), que corresponden a los mapas de isoprofundidad que se muestran a continuación.

Estacion	X(UTM)	Y(UTM)	G5m(MPa)	G7m(Mpa)	G10m(Mpa)	G15m(MPa)	G20m(MPa)
GUATIRE 1	766667	1157948	144.6	143.3	208.6	213.1	297.4
	766698	1157951	139.4	138.1	249.3	254.7	188.0
	766731	1157953	139.4	138.1	249.3	254.7	188.1
	766763	1157955	152.5	151.1	210.9	261.8	188.1
	766795	1157957	150.5	129.4	175.8	253.3	235.4
	766827	1157959	152.5	151.1	171.5	253.3	235.3
	766861	1157962	152.5	151.1	202.5	279.8	260.1
	766891	1157964	141.9	140.6	188.9	302.0	282.0
	766923	1157966	138.0	136.8	180.1	294.6	273.9
	766680	1157983	126.8	125.7	190.5	194.6	286.1
	766712	1157984	138.1	136.9	252.9	258.4	182.3
	766744	1157985	138.1	136.9	261.5	267.2	191.0
	766776	1157987	134.3	133.1	202.2	242.9	196.9
	766808	1157988	138.1	136.9	178.7	252.4	234.6
	766840	1157988	158.0	156.5	174.4	251.3	233.8
	766874	1157989	143.3	142.0	187.4	261.8	243.4
	766904	1157990	140.2	140.2	210.3	214.9	256.8
	766936	1157991	138.0	136.8	189.1	283.4	264.1
	766699	1157967	143.6	142.3	210.3	214.9	299.5
	766732	1157967	143.6	142.3	261.0	266.7	191.5
	766766	1157969	143.6	142.3	261.0	266.7	191.5
	766800	1157970	215.7	213.8	156.0	300.1	212.8
	766832	1157972	205.6	178.5	99.2	305.5	365.4
	766866	1157974	160.2	158.8	165.1	284.5	248.0
	766898	1157975	135.0	133.7	195.6	291.0	270.6
	766930	1157977	135.0	133.7	195.6	291.0	270.6
	766962	1157978	134.9	133.6	176.0	273.5	338.9

Tabla VII-22. Estación Guatire 1. Valores de Rigidez para 5, 7, 10, 15 y 20 metros.

En los mapas de las figuras VI-23 a la VI-27 se detalla la variación del valor de rigidez con respecto a la profundidad de la estación Guatire 1. Este parámetro se mantiene estable hasta los 10m ($G_{prom} = 150\text{Mpa}$ a los 5m y 7m), donde se produce un aumento en el valor hasta 250Mpa al Este de la ruta. A los 15m de profundidad el valor aumenta a 250Mpa en promedio para finalmente a los 20m de profundidad, encontrar los mayores valores de rigidez ($G=300\text{Mpa}$), hacia el Este de la ruta, y un valor mínimo de 200Mpa hacia el Oeste.

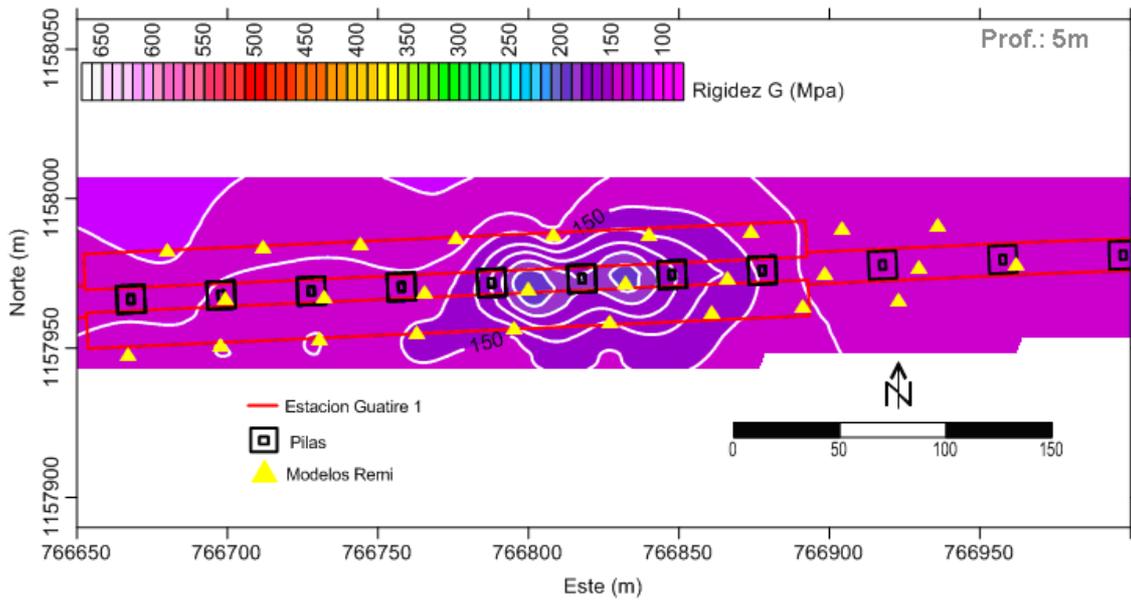


Figura VII-28. Estación Guatire 1. Mapa de Rigidez (G) a los 5m de profundidad.

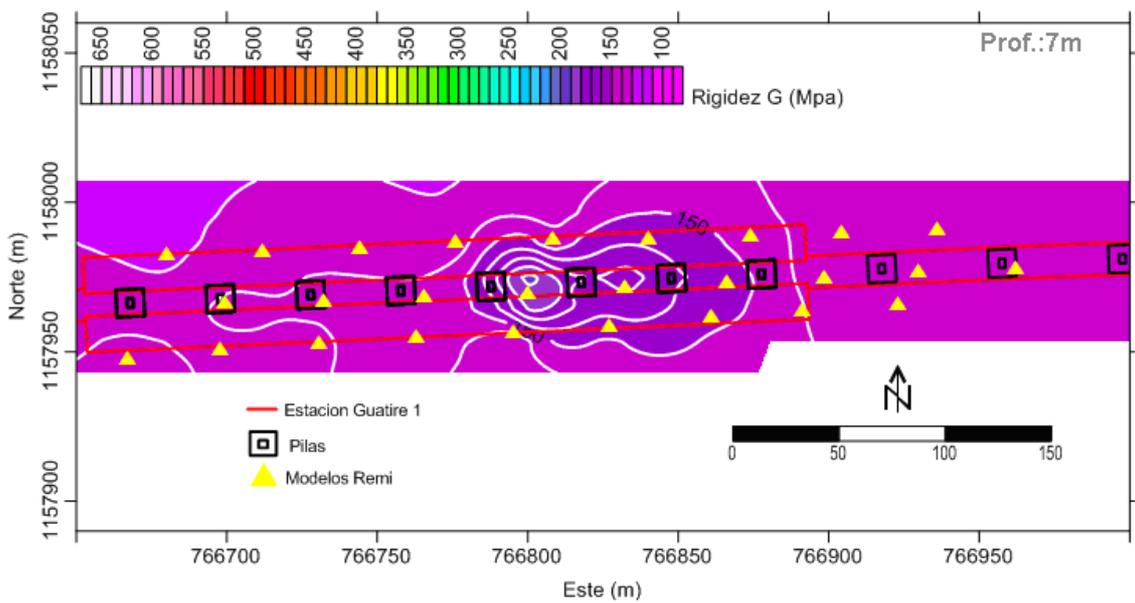


Figura VII-29. Estación Guatire 1. Mapa de Rigidez (G) a los 7m de profundidad.

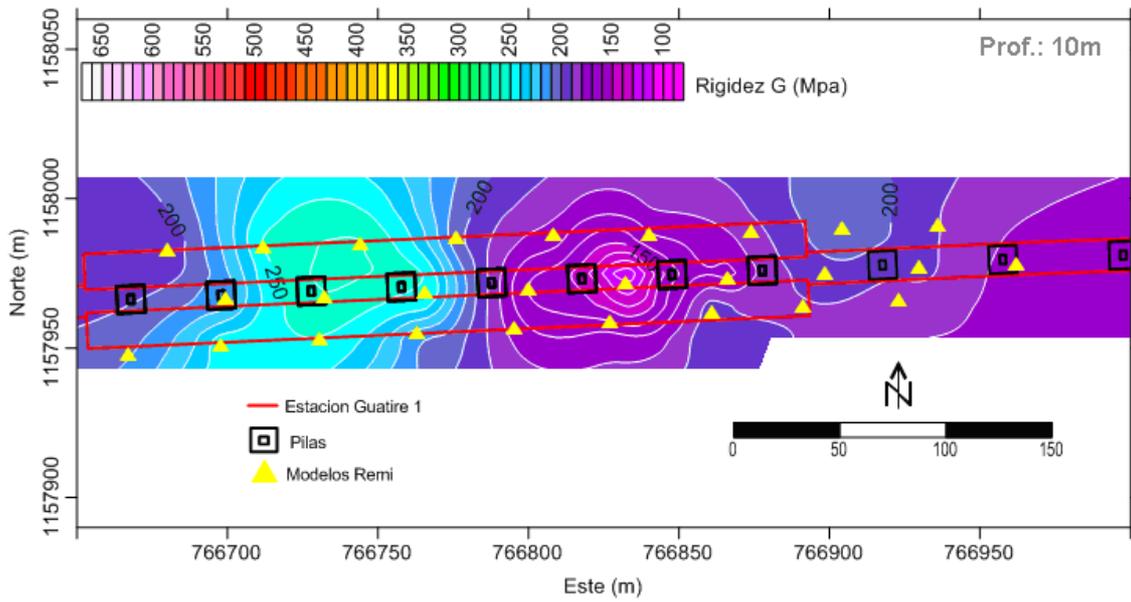


Figura VII-30. Estación Guatire 1. Mapa de Rigidez (G) a los 10m de profundidad

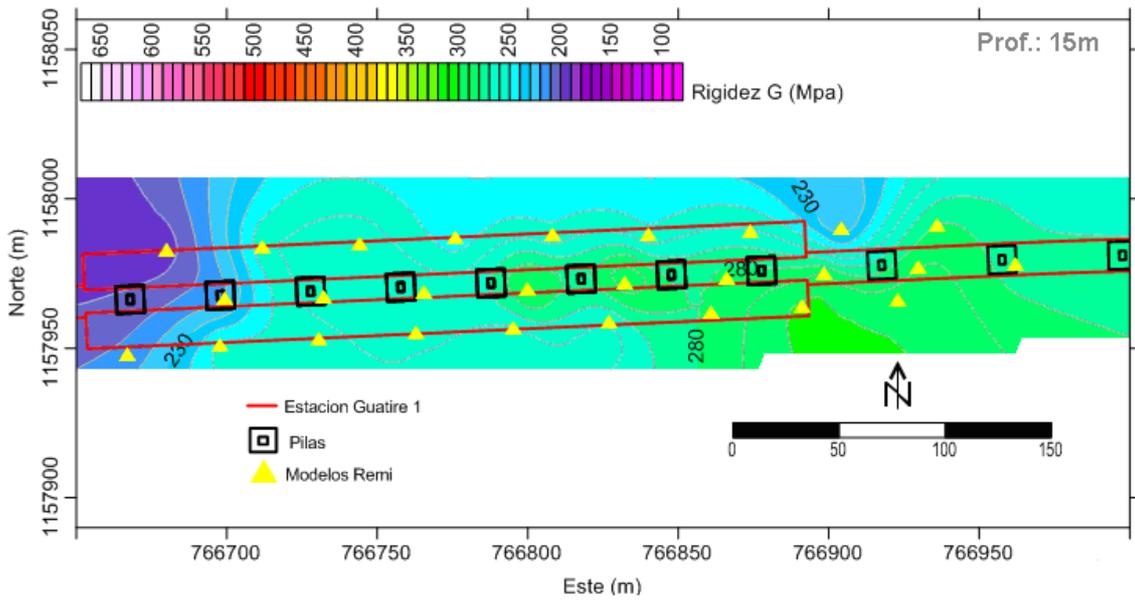


Figura VII-31. Estación Guatire 1. Mapa de Rigidez (G) a los 15m de profundidad.

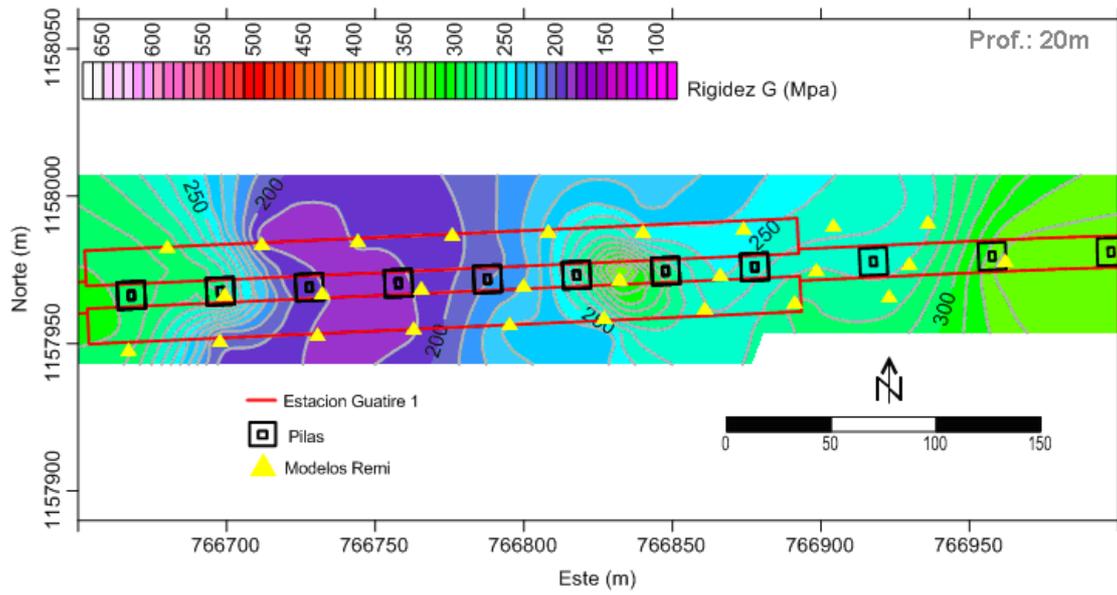


Figura VII-32. Estación Guatire 1. Mapa de Rigidez (G) a los 20m de profundidad.

En resumen la variación del Módulo de Rigidez con la profundidad se observa en la figura VII-33, a los 10 metros se observa una inversión de velocidad por lo tanto decrece el valor de G, a partir de allí se incrementa hasta los 20 metros.

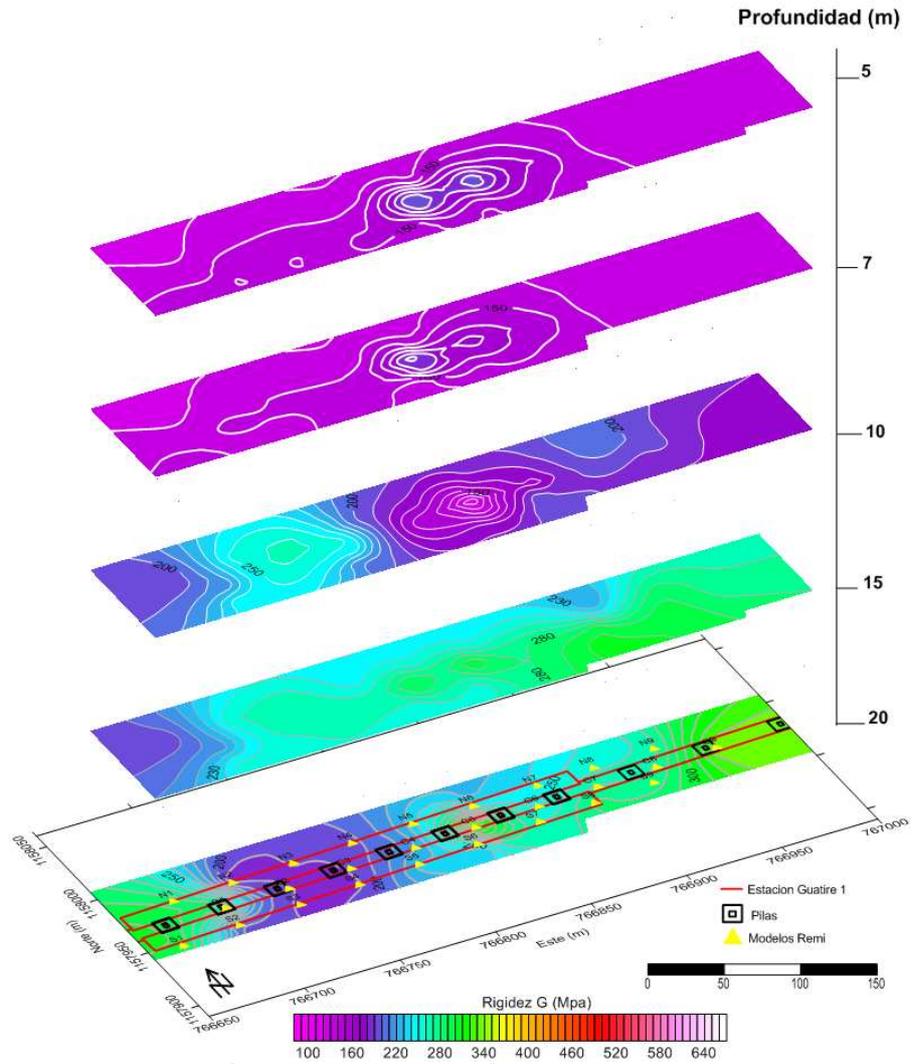


Figura VII-33. Estación Guatire 1. Variación de Rigidez G con la profundidad.

Estación Guatire 2

Parámetros obtenidos con el método DownHole

Se muestran los valores de los parámetros elásticos, presentados por capas en la tabla VI-23, en la figura VI-28 se observa el comportamiento en profundidad de estos parámetros metro a metro (valores interválicos) observándose un incremento de G_{max} , E , K y E_{est} con la profundidad y en la tabla VI-24 se muestran los correspondientes valores interválicos. En este caso se observa que el coeficiente de Poisson para las diferentes capas indica que tienen un comportamiento más duro que en las estaciones anteriores, posiblemente se pueda asociar esto a alguna característica de sedimentos pleistocénicos procedentes de la Formación Guatire.

Espesor	V_p/V_s	Poisson	G_{max}	E	$K (Ev)$	E_{est}
(m)		ν	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
6	1.9	0.35	208.9	550	499.2	137
6	2	0.33	267.5	712.4	705.6	185
18	1.9	0.32	422.5	1116	1034	277
----	2.4	0.3	587.9	1644	2694	387

Tabla VII-23. DH Estación Guatire 2. Datos de los estratos sísmicos por capa. Velocidades y constantes elásticas promedio.

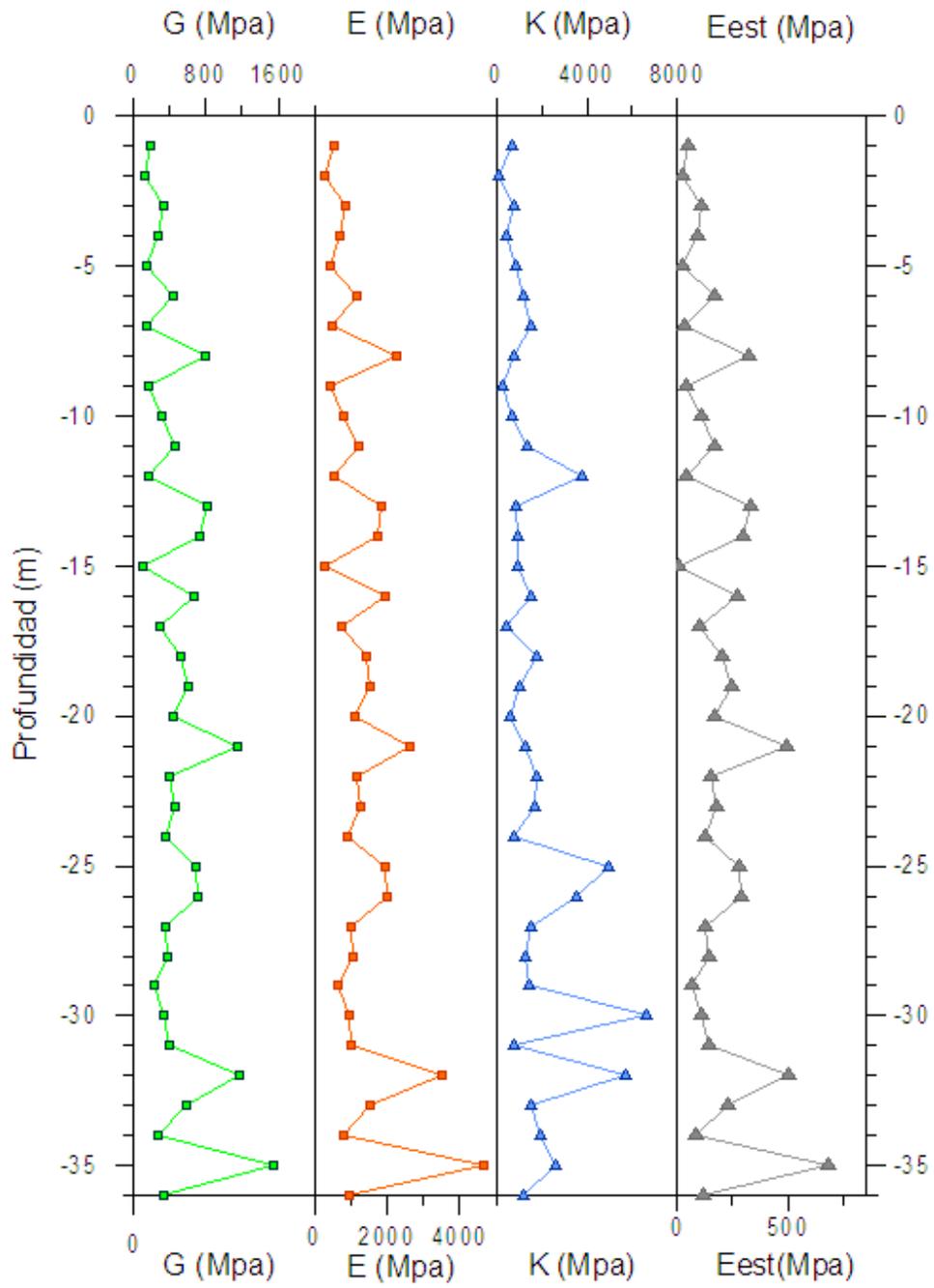


Figura VII-34. DH Guatire 2. Parámetros elásticos interváticos.

Profundidad (m)	Gmax Mpa	E Mpa	K(Ev) Mpa	Eest _{0.1%} (Mpa)
-1	198.0	541.8	686.0	106.9
-2	129.0	293.9	135.7	69.7
-3	328.4	867.8	808.6	177.3
-4	278.4	689.0	437.5	150.3
-5	141.8	403.6	871.0	76.6
-6	443.5	1184.8	1201.3	239.5
-7	158.7	460.0	1509.0	85.7
-8	786.9	2280.7	760.3	424.9
-9	163.4	406.0	262.7	88.2
-10	311.8	814.7	701.0	168.4
-11	455.2	1231.7	1397.5	245.8
-12	174.9	516.6	3787.8	94.4
-13	808.9	1862.3	889.6	436.8
-14	727.8	1728.0	920.2	393.0
-15	97.8	284.0	990.0	52.8
-16	672.6	839.7	1539.2	363.2
-17	299.0	740.9	473.1	161.5
-18	520.8	1426.0	1815.0	281.2
-19	608.4	1517.7	1000.9	328.5
-20	446.5	1089.8	649.4	241.1
-21	1147.6	2634.4	1246.7	619.7
-22	408.8	1140.8	1818.3	220.7
-23	464.7	1278.9	1717.9	251.0
-24	351.5	911.9	749.3	189.8
-25	685.9	1966.8	4944.0	370.4
-26	702.9	2015.6	3520.4	379.6
-27	363.9	1011.9	1537.6	196.5
-28	384.6	1069.3	1289.2	207.7
-29	221.5	631.7	1426.3	119.6
-30	325.9	961.9	6626.3	176.0
-31	387.5	990.5	743.9	209.2
-32	1170.0	3486.2	5740.0	631.8
-33	580.2	1547.1	1547.2	313.3
-34	271.9	812.0	1975.4	146.8
-35	1552.1	4634.8	2582.4	838.1
-36	339.2	928.0	1172.4	183.1

Tabla VII-24. Estación Guatire 2. Valores de Velocidad de ondas s y p y parámetros elásticos.

Modelo de Rigidez G obtenido con el método ReMi

En la tabla VI-25 se muestran los valores de los modelos calculados para el módulo de rigidez G con la velocidad de onda de corte obtenidas con el método ReMi para las diferentes profundidades (5, 7, 10, 15, 20 metros), que corresponden a los mapas de isoprofundidad que se muestran a continuación.

Estacion	X(UTM)	Y(UTM)	G5m(MPa)	G7m(Mpa)	G10m(Mpa)	G15m(MPa)	G20m(MPa)
GUATIRE 2	768258	1157162	207.5	310.3	320.5	496.6	547.2
	768287	1157152	207.5	310.3	320.5	496.6	547.2
	768318	1157140	210.4	335.4	346.4	506.8	558.5
	768347	1157128	193.9	301.0	310.9	499.0	549.9
	768378	1157119	196.2	254.7	263.1	525.0	578.5
	768482	1157093	195.3	273.8	282.7	486.3	535.9
	768514	1157090	207.5	321.8	332.4	486.3	535.9
	768546	1157088	193.9	299.2	309.0	481.5	530.6
	768578	1157084	200.0	331.5	342.4	595.7	656.5
	768610	1157081	179.3	325.6	336.3	587.3	647.2
	768333	1156953	187.9	237.9	289.7	468.7	516.6
	768355	1156978	210.7	275.6	284.6	517.3	570.1
	768376	1157000	210.7	275.6	284.6	517.3	570.1
	768398	1157023	207.5	279.1	288.3	509.2	561.2
	768419	1157048	207.5	307.4	298.6	509.2	561.2
	768376	1156938	200.0	299.2	293.3	506.8	558.5
	768402	1156955	198.4	261.5	270.1	496.3	547.0
	768429	1156973	201.4	265.0	273.7	506.8	558.5
	768456	1156990	198.8	270.3	279.1	432.2	476.3
	768481	1157007	210.5	270.3	279.1	432.2	476.3
	768296	1156961	141.1	334.0	345.0	482.3	531.5
	768311	1156933	182.0	314.2	324.6	454.9	501.3
	768323	1156905	169.6	293.5	303.1	484.5	533.9
	768342	1156877	118.9	225.4	232.8	521.1	574.3
768357	1156849	171.9	265.3	274.0	352.8	388.9	

Tabla VII-25. Estación Guatire 2. Valores de Rigidez para 5, 7, 10, 15 y 20 metros.

En los mapas de isoprofundidad de las figuras VI-29 a la VI-33 se detalla la variación del valor de rigidez con respecto a la profundidad de la estación Guatire 2. Este parámetro aumenta desde los 150Mpa a los 5m hasta 300Mpa a los 7m y posteriormente 350Mpa a los 10m. Desde allí el aumento llega a 500Mpa en

promedio a partir de los 15m para finalmente a los 20m de profundidad, encontrar los mayores valores ($G=650\text{Mpa}$), hacia el Este del área, y un valor casi uniforme de 350Mpa en promedio a lo largo de la ruta de la estación Guatire 2.

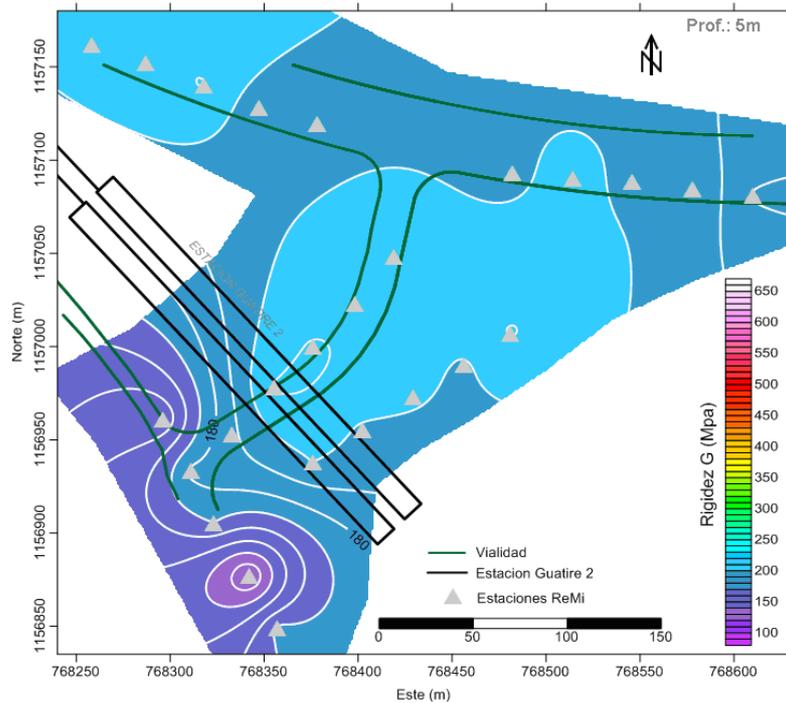


Figura VII-35. Estación Guatire 2. Mapa de Rigidez (G) a los 5m de profundidad.

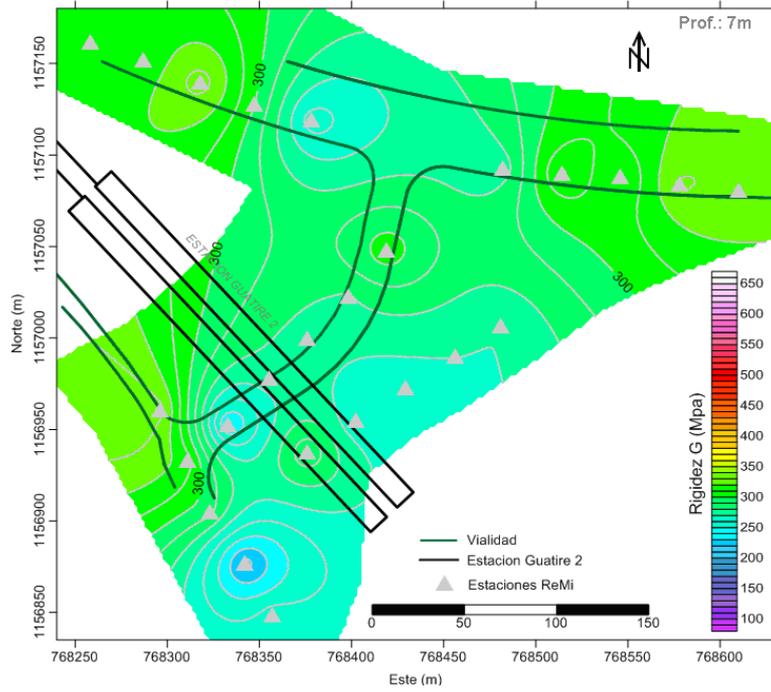


Figura VII-36. Estación Guatire 2. Mapa de Rigidez (G) a los 7m de profundidad.

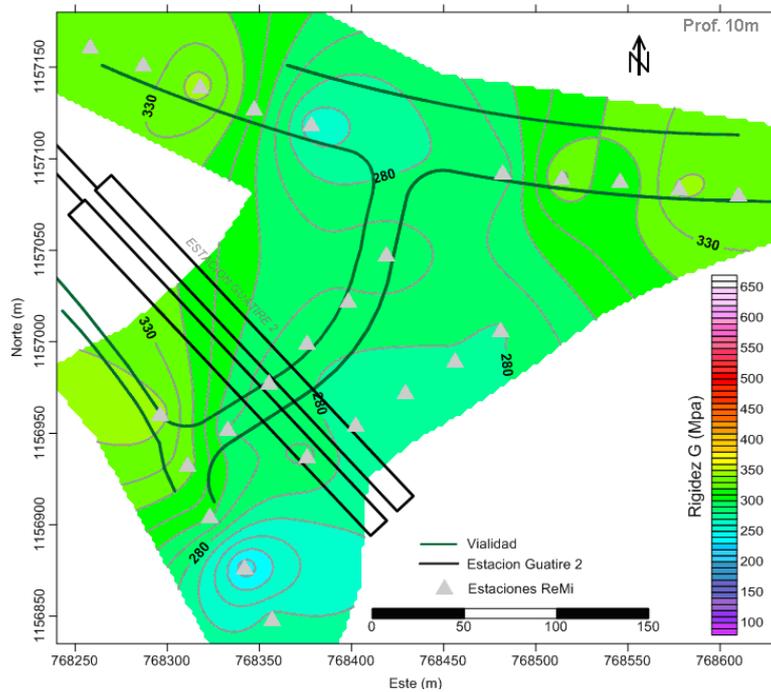


Figura VII-37. Estación Guatire 2. Mapa de rigidez (G) a los 10 de profundidad

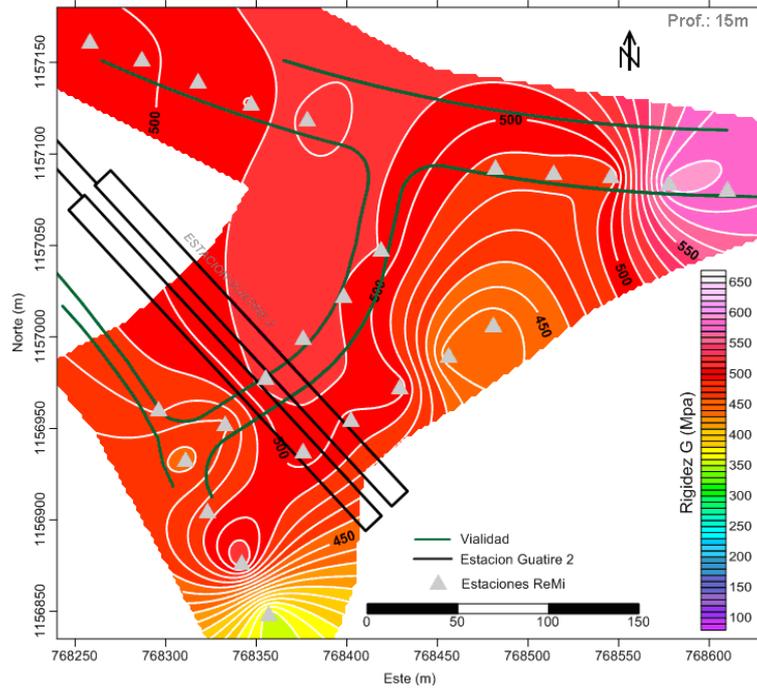


Figura VII-38. Estación Guatire 2. Mapa de rigidez (G) a los 15 de profundidad.

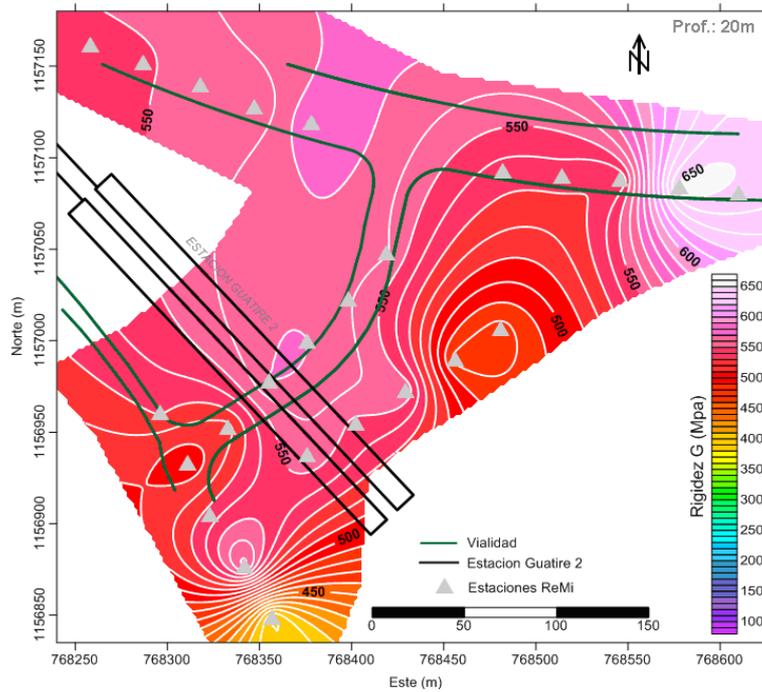


Figura VII-39. Estación Guatire 2. Mapa de rigidez (G) a los 20 de profundidad

En resumen la variación del Módulo de Rigidez con la profundidad se observa en la figura VII-40, hasta los 20 metros este Módulo se incrementa progresivamente.

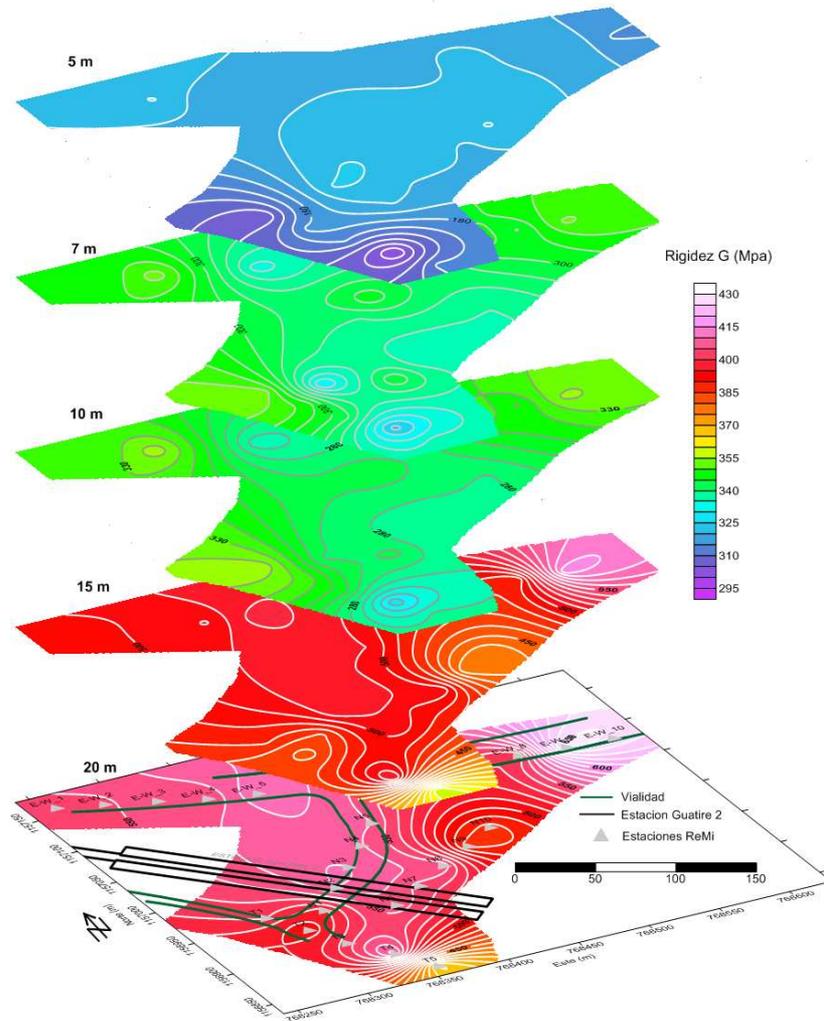


Figura VII-40. Estación Guatire 2. Variación de Rigidez G con la profundidad.

Realizando el análisis general de estas estaciones ubicadas en la zona del pleistoceno, el primer punto relevante es el comportamiento de los valores de Poisson que indican suelos más duros y difieren en un rango muy bajo a los obtenidos en la zona del Holoceno, posiblemente la edad geológica juega un rol fundamental en este caso. Otro punto a destacar es el comportamiento en profundidad de la rigidez, de igual manera que en las dos primeras estaciones, aumentan en profundidad (salvo en la capa con inversión de velocidad), pero los valores son mayores en esta zona (pleistoceno), hecho que es evidente ya que las velocidades también son mayores, dando consistencia a la suposición de que los sedimentos en esta zona son más duros y densos que en la zona del holoceno.

Capacidad de Carga Permissible

La investigación de velocidades de ondas de corte Vs, combinadas con la información de densidades de las unidades investigadas, ofrece la posibilidad de analizar las condiciones de los suelos *in situ* y calcular la capacidad de carga permissible - *Allowable Bearing Capacity* (para fundaciones superficiales) en forma económica y eficaz. Complementando este cálculo con las pruebas de laboratorio se puede expandir la representatividad del análisis tanto verticalmente como espacialmente. Esto resulta particularmente evidente considerando la mayor cantidad de datos, y la distribución espacial posible, con medidas sísmicas respecto a las pruebas de laboratorio (que además no representan condiciones *in situ*).

En la Tabla VI-26 se presentan los valores de capacidad de carga permissible (**qa**) obtenidos desde el DownHole para los primeros 15m de profundidad en cada una de las estaciones estudiadas, en este caso la escogencia de éste valor (15 m) depende de la profundidad a la cual los pilotes serán establecidos, para las futuras estaciones del metro Guarenas-Guatire. En líneas generales los valores de capacidad de carga están en el orden de magnitud correspondiente a suelos "Medio/duro", según la tabla Tezcan (marco teórico).

Estación	Guarenas 1	Guarenas 2	Guatire 1	Guatire 2
Prof (m)	Qa (kPa)	Qa (kPa)	Qa (kPa)	Qa (kPa)
-1	141.0	101.3	130.1	141.8
-2	115.8	81.9	96.0	119.9
-3	174.8	169.6	131.5	187.0
-4	96.1	119.1	113.2	174.3
-5	108.8	90.5	132.5	128.6
-6	181.1	110.8	128.4	218.2
-7	117.7	82.7	107.5	187.8
-8	121.7	141.6	110.1	291.3
-9	115.7	101.4	147.3	190.4
-10	140.9	160.4	108.6	190.3
-11	103.1	120.4	337.1	226.9
-12	111.5	126.3	125.0	146.6
-13	104.5	119.8	183.0	150.1
-14	87.3	235.0	153.4	135.8
-15	130.3	150.5	135.0	113.1

Tabla VII-26. Capacidad de carga permisible para fundaciones superficiales obtenidas DH.

Vs30, Profundidad Vs=500m/s y Clasificación de sitio (suelo)

Los parámetros Vs30 y VsP son usados para la clasificación de suelo del sitio. El parámetro Vs30 representa la velocidad equivalente (no promedio) de ondas de corte en los primeros 30 m (ver ec.III-19). En la norma Covenin VsP es la velocidad promedio de las ondas de corte en el perfil geológico. No se refiere a ninguna profundidad específica de referencia y por lo tanto es difícil correlacionar valores de VsP de lugares diferentes.

La profundidad donde se encuentra la Vs=500 m/s identifica un nivel considerado como un substrato geotécnico (norma Covenin).

Estación Guarenas 1

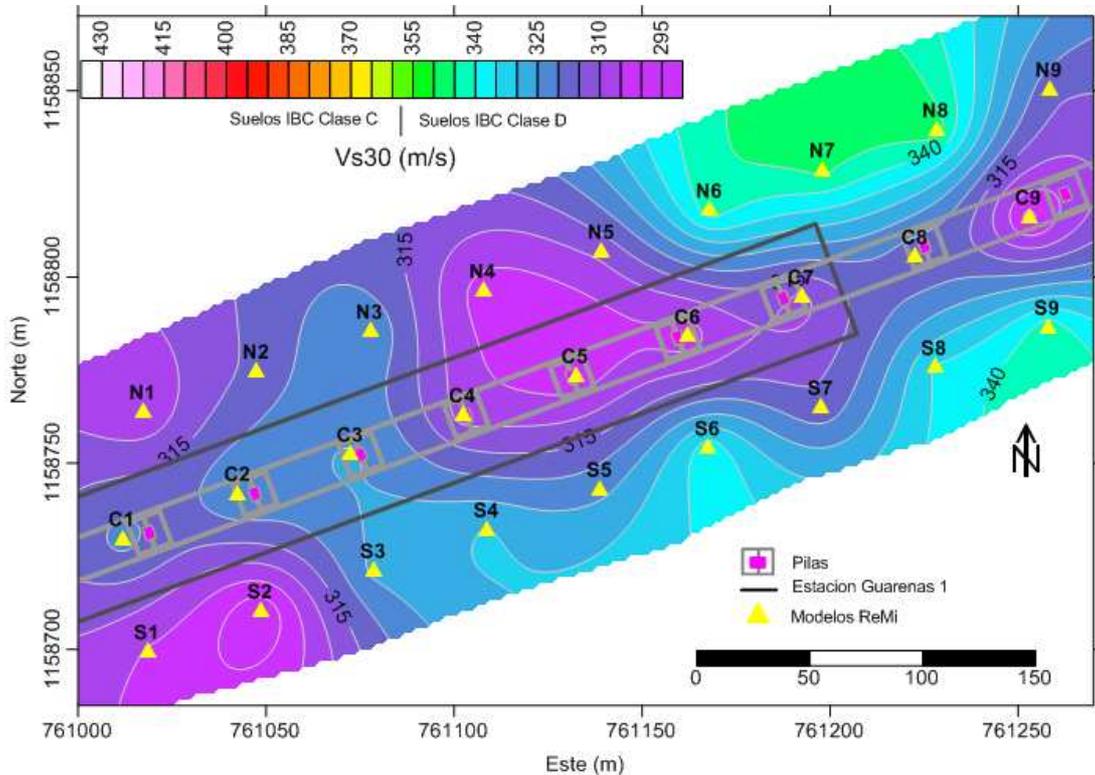


Figura VII-41. Estación Guarenas 1. Mapa de Vs30 y clasificación de sitio IBC-NEHRP

El mapa de la figura VI-34 y la tabla VI-27, muestra en detalle la distribución de la Vs30 a lo largo de la ruta del metro sobre la futura estación Guarenas 1 y en la tabla VI-22 se muestran los modelos ReMi obtenidos. Se puede observar como el valor de Vs30 es bastante uniforme en todo el trayecto con valores máximos de 347 m/s y mínimos de 295 m/s. Los valores máximos se ubican al Sur y Nor-Oeste de la ruta mientras que los mínimos se distribuyen al Nor-este de la misma indicando mayor compactación y rigidez hacia el Sur y Nor-Oeste. La profundidad de la Vs=500 m/s se ubicó a los 22,5 metros de profundidad en promedio y la Vs30 obtenida mediante el DownHole fue de 344,7.

Igualmente como se puede observar en la figura anterior, el tipo de suelo según la clasificación de suelo **IBC- NEHRP- ASCE** (TABLE 1615.1.1: Site Class Definitions), corresponde a Clase D ($180 < Vs < 360$ m/s), Suelos firmes/rígidos (definición norma Sensu Strictu), $15 < N_{spt} < 50$.

Por otro lado según la norma **COVENIN – MINDUR 1756-1- 2001**, la clasificación es:

- Profundidad substrato geotécnico ($V_s > 500 \text{m/s}$) $< 25 \text{m}$.
- V_sP en los 30 m de investigación (V_{s30} promedio) = 332.3m/s .
- Clase C, Suelos duros densos (definición norma *Sensu Strictu*).

Estacion	Simbología	X(UTM)	Y(UTM)	Vs30(m/s)	
GUARENAS 1	S1	761018	1158699	304.5	
	S2	761049	1158710	295.2	
	S3	761079	1158721	326.1	
	S4	761109	1158732	330.4	
	S5	761139	1158743	323.6	
	S6	761168	1158754	338.3	
	S7	761198	1158765	316.5	
	S8	761228	1158776	335.5	
	S9	761258	1158786	343.3	
	N1	761017	1158764	305.5	
	N2	761048	1158774	316.4	
	N3	761078	1158785	324.5	
	N4	761108	1158796	302.3	
	N5	761139	1158807	311.3	
	N6	761168	1158818	342.4	
	N7	761198	1158829	346.0	
	N8	761228	1158839	347.4	
	N9	761258	1158850	316.7	
	C1	761012	1158730	321.9	
	C2	761043	1158742	324.8	
	C3	761073	1158752	325.4	
	C4	761102	1158763	308.2	
	C5	761132	1158773	301.9	
	C6	761162	1158784	302.1	
	C7	761192	1158795	308.8	
	C8	761223	1158805	316.3	
	C9	761253	1158816	298.2	
	Promedio				319.8
	Maximo				347.4
Minimo				295.2	

Tabla VII-27. Estación Guarenas 1. Modelos ReMi de Vs30.

Estación Guarenas 2

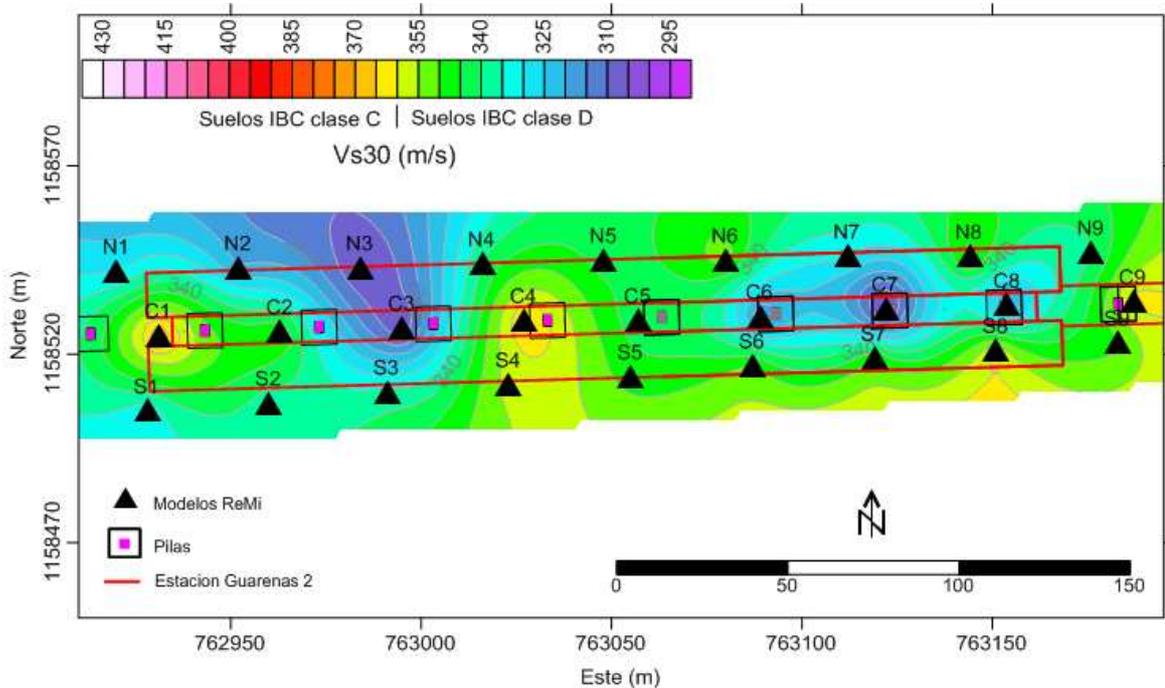


Figura VII-42. Estación Guarenas 2. Mapa de Vs30 y clasificación de sitio IBC-NEHRP

El mapa de la figura VI-35 y la tabla VI-28, muestra en detalle la distribución de la Vs30 a lo largo de la ruta del metro sobre la futura estación Guarenas 2 y en la tabla VI-23 se muestran los modelos ReMi obtenidos. Se puede observar como la Vs30 es bastante uniforme en todo el trayecto con valores máximos de 370 m/s y mínimos de 300 m/s (Vs30 promedio = 335,2m/s). Los valores máximos se observaron del centro hacia el Este de la ruta indicativo esto de mayor compactación y rigidez. Por otro lado los valores mínimos se presentan como pequeñas zonas hacia el Oeste de la sección y entre los modelos centrales C6 y C8. La profundidad de la Vs=500m/s se ubicó a los 20 metros de profundidad en promedio y la Vs30 obtenida mediante el DownHole fue de 333,4m/s.

Igualmente como se puede observar en la figura anterior, el tipo de suelo según la clasificación de suelo **IBC- NEHRP- ASCE** (TABLE 1615.1.1: Site Class Definitions), corresponde a Clase D ($180 < Vs < 360$ m/s), Suelos firmes/rígidos (definición norma Sensu Strictu), $15 < N_{spt} < 50$.

Por otro lado según la norma **COVENIN – MINDUR 1756-1- 2001**, la clasificación es:

- Profundidad substrato geotécnico ($V_s > 500 \text{ m/s}$) $< 25 \text{ m}$.
- V_sP en los 30 m de investigación (V_{s30} promedio) = $334,2 \text{ m/s}$.
- Clase C, Suelos duros densos (definición norma *Sensu Strictu*).

Estacion	Simbología	X(UTM)	Y(UTM)	Vs30(m/s)
GUARENAS 2	S1	762928	1158505	331.6
	S2	762960	1158507	337.1
	S3	762991	1158510	337.1
	S4	763023	1158512	356.9
	S5	763055	1158514	347.5
	S6	763087	1158517	351.8
	S7	763119	1158519	350.5
	S8	763151	1158521	359.7
	S9	763183	1158523	348.9
	N1	762920	1158542	328.8
	N2	762952	1158543	319.9
	N3	762984	1158543	304.9
	N4	763016	1158544	340.5
	N5	763048	1158545	342.9
	N6	763080	1158545	352.5
	N7	763112	1158546	331.6
	N8	763144	1158546	352.8
	N9	763176	1158547	339.4
	C1	762931	1158525	369.0
	C2	762963	1158526	349.6
	C3	762995	1158527	305.1
	C4	763027	1158529	365.3
	C5	763057	1158529	341.6
	C6	763089	1158530	315.1
	C7	763122	1158532	299.6
	C8	763154	1158533	317.7
	C9	763187	1158534	362.0
Promedio				339.2
maximo				369.0
minimo				299.6

Tabla VII-28. Estación Guarenas 2. Modelos ReMi de Vs30.

La V_{s30} en esta zona del Holoceno los valores promedios están entre $319,8$ y $339,2 \text{ m/s}$ y son perfectamente aceptables comparados con los resultados

obtenidos por Skrainka (2009) y Willis (2008), cuyos resultado fueron de 357,7 m/s que concuerdan para una geología con propiedades similares.

Estación Guatire 1

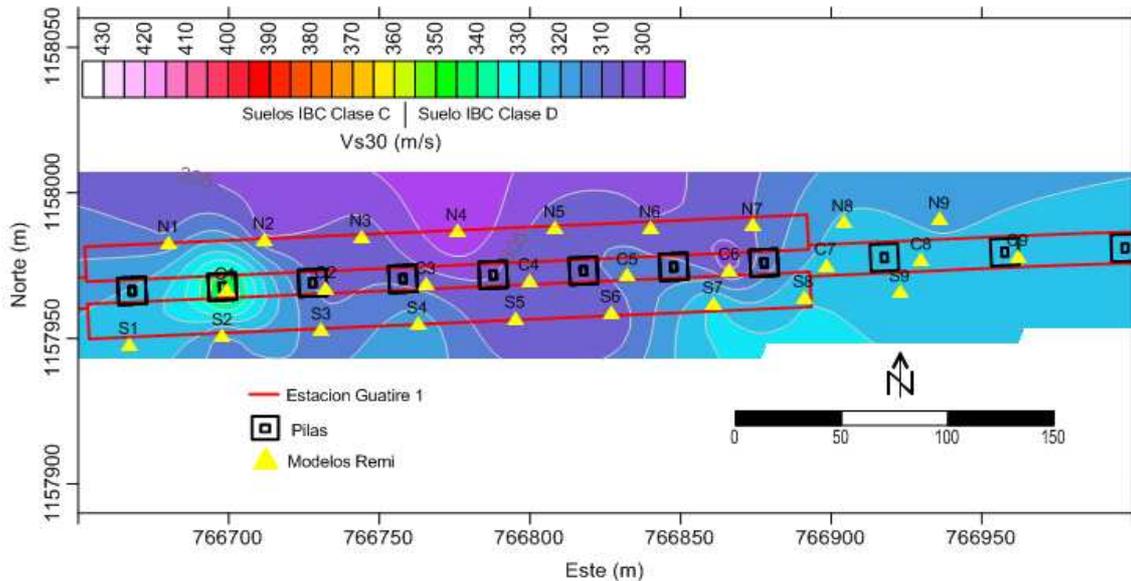


Figura VII-43. Estación Guatire 1. Mapa de Vs30 y clasificación de sitio IBC-NEHRP.

El mapa de la figura VI-36 y la tabla VI-29 muestra en detalle la distribución de la Vs30 a lo largo de la ruta del metro sobre la futura estación Guatire 1 y en la tabla VI-24 se muestran los modelos ReMi obtenidos. Se puede observar como la Vs30 es bastante uniforme en todo el trayecto con valores máximos de 353 m/s y mínimos de 294 m/s (Vs30 promedio = 323,5m/s). Los valores máximos se ubican al Sur y Nor-Oeste de la ruta mientras que los mínimos se distribuyen al Nor-Este de la misma indicando mayor compactación y rigidez hacia el Sur. La profundidad de la Vs=500m/s no se identificó en ninguno de los modelos y la Vs30 obtenida mediante el DownHole fue de 310,9 m/s.

Igualmente como se puede observar en la figura anterior, el tipo de suelo según la clasificación de suelo **IBC- NEHRP- ASCE** (TABLE 1615.1.1: Site Class Definitions), corresponde a Clase D ($180 < Vs < 360$ m/s), Suelos firmes/rígidos (definición norma Sensu Strictu), $15 < N_{spt} < 50$.

Por otro lado según la norma **COVENIN – MINDUR 1756-1- 2001**, la clasificación es:

- Profundidad substrato geotécnico ($V_s > 500 \text{ m/s}$) $> 40 \text{ m}$.
- V_{sP} en los 30 m de investigación (V_{s30} promedio) = 317,2 m/s,
- Clase C, Suelos duros densos (definición norma *Sensu Strictu*).

Estacion	Simbologia	X(UTM)	Y(UTM)	Vs30(m/s)
GUATIRE 1	S1	766667	1157948	324.3
	S2	766698	1157951	312.0
	S3	766731	1157953	313.0
	S4	766763	1157955	318.8
	S5	766795	1157957	304.8
	S6	766827	1157959	303.9
	S7	766861	1157962	327.0
	S8	766891	1157964	324.6
	S9	766923	1157966	321.8
	N1	766680	1157983	310.9
	N2	766712	1157984	305.0
	N3	766744	1157985	308.2
	N4	766776	1157987	294.2
	N5	766808	1157988	308.1
	N6	766840	1157988	305.3
	N7	766874	1157989	310.2
	N8	766904	1157990	321.3
	N9	766936	1157991	319.0
	C1	766699	1157967	352.6
	C2	766732	1157967	307.9
	C3	766766	1157969	307.9
	C4	766800	1157970	309.6
	C5	766832	1157972	314.4
	C6	766866	1157974	302.6
	C7	766898	1157975	321.7
	C8	766930	1157977	321.7
	C9	766962	1157978	322.1
Promedio				323.5
maximo				352.6
minimo				294.2

Tabla VII-29. Estación Guatire 1. Modelos ReMi de V_{s30} .

Estación Guatire 2

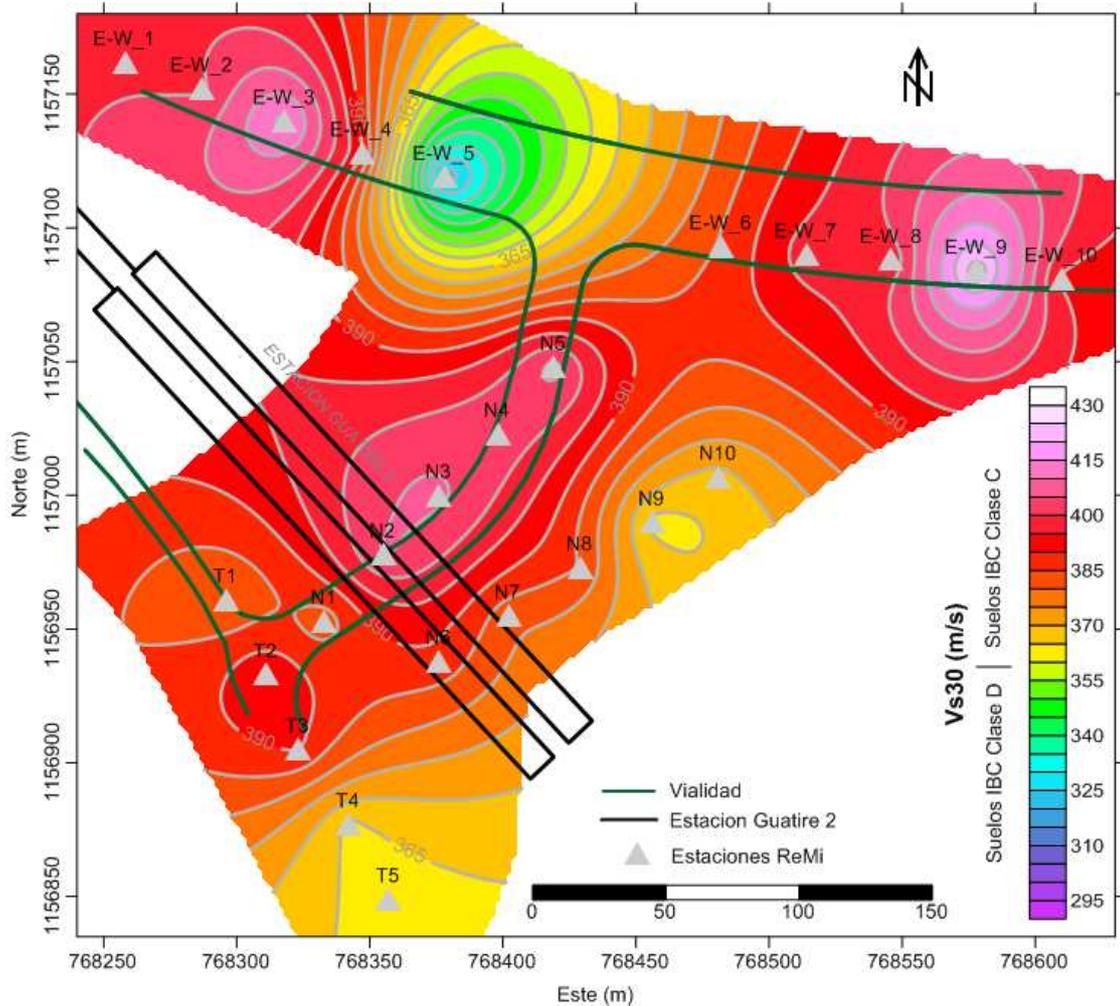


Figura VII-44. Estación Guatire 2. Mapa de V_{s30} y clasificación de sitio IBC-NERPH.

El mapa de la figura VI-37 y la tabla VI-30 muestra en detalle la distribución de la V_{s30} alrededor de la ruta del metro sobre la estación Guatire 2 y en la tabla VI-25 se indican los modelos ReMi obtenidos. Se puede observar como la V_{s30} es uniforme en toda la zona con valores máximos de 430 m/s y mínimos de 320 m/s (V_{s30} promedio = 375,0m/s). Los valores máximos se ubican en la parte central y norte de la zona coincidiendo con la mayor parte de la ruta, mientras que los mínimos se distribuyen al Sur de la misma indicando menor compactación y

rigidez. La profundidad de la $V_s=500\text{m/s}$ se ubicó a los 20 metros de profundidad en promedio y la V_{s30} obtenida mediante el DownHole fue de 397,1 m/s.

Igualmente como se puede observar en la figura anterior, el tipo de suelo según la clasificación de suelo **IBC- NEHRP- ASCE** (TABLE 1615.1.1: Site Class Definitions), corresponde a Clase C ($360 < V_s < 760$ m/s), Suelos muy densos y roca suave (definición norma Sensu Strictu), $N_{spt} > 50$.

Por otro lado según la norma **COVENIN – MINDUR 1756-1- 2001**, la clasificación es:

- Profundidad substrato geotécnico ($V_s > 500\text{m/s}$) $< 25\text{m}$.
- V_{sP} en los 30 m de investigación (V_{s30} promedio) = 386,0m/s.
- Clase C, Suelos duros densos (definición norma Sensu Strictu).

Estacion	Simbologia	X(UTM)	Y(UTM)	$V_{s30}(\text{m/s})$	
GUATIRE 2	E-W_1	768258	1157162	399.4	
	E-W_2	768287	1157152	399.4	
	E-W_3	768318	1157140	416.6	
	E-W_4	768347	1157128	390.9	
	E-W_5	768378	1157119	321.0	
	E-W_6	768482	1157093	385.6	
	E-W_7	768514	1157090	397.6	
	E-W_8	768546	1157088	396.6	
	E-W_9	768578	1157084	428.3	
	E-W_10	768610	1157081	393.9	
	N1	768333	1156953	382.4	
	N2	768355	1156978	405.4	
	N3	768376	1157000	405.9	
	N4	768398	1157023	402.5	
	N5	768419	1157048	406.6	
	N6	768376	1156938	388.5	
	N7	768402	1156955	381.6	
	N8	768429	1156973	384.8	
	N9	768456	1156990	363.6	
	N10	768481	1157007	368.4	
	T1	768296	1156961	380.0	
	T2	768311	1156933	395.0	
	T3	768323	1156905	390.5	
	T4	768342	1156877	364.0	
	T5	768357	1156849	363.7	
	promedio				388.5
	maximo				428.3
	minimo				321.0

Tabla VII-30. Estación Guatire 2. Modelos ReMi de V_{s30} .

En esta zona la Vs30 está comprendida entre 323 y 389 m/s, indicando valores por encima de los obtenidos en la zona anterior, lo que permite interpretar un suelo más duro, más compactado, como consecuencia de la edad geológica presente (Pleistoceno), los sedimentos tales como arcillas, arenas son de mayor edad.

CONCLUSIONES

El análisis y la interpretación de los registros de Refracción por Microtremores (ReMi) y el método de pozo DownHole, permiten concluir lo siguiente:

- La técnica de Refracción por Microtremores es un método apropiado para la investigación de ondas de corte, en ambientes de alto ruido sísmico, constituyendo un método óptimo en términos económicos y de adquisición, usando la misma instrumentación que el método de refracción estándar.
- El método ReMi como DownHole (DH) permiten ver capas con inversión de velocidad.
- Aunque muy local, el método DH permite identificar metro a metro, los valores de velocidad de Onda P y Onda S, por lo tanto los parámetros que se derivan de éstas con mayor detalle en profundidad.
- Los valores de Vs30, obtenidos en la zona del Holoceno (Estación Guarenas 1 y 2) están entre 319,8 y 339,2 m/s, son aceptables comparados con los resultados obtenidos por Skrainka (2009), cuyos resultado fueron de 357,7 m/s que a su vez concuerdan con otros datos (Willis, 2008) para una geología con propiedades similares.
- Los valores de Vs30, obtenidos en la zona de Pleistoceno (Estación Guatire 1 y 2) comprendidos entre 323 y 389 m/s, permitiendo interpretar un suelo más duro, más compactado, como consecuencia de la edad geológica presente, los sedimentos tales como arcillas, arenas son de mayor edad.

- El cálculo de los parámetros elásticos y geotécnicos superficiales del subsuelo a través de los perfiles de velocidades de ondas p y ondas s, mediante los métodos sísmicos, demostró ser unas de las más rápidas y eficientes formas de obtenerlos. Siendo de fundamental importancia para el diseño y elaboración de esquemas de caracterización de sitio previo a la construcción de edificaciones, estructuras industriales, trenes, ferrocarriles, etc.
- Los valores calculados de coeficiente de Poisson en la zona del Holoceno a partir de las velocidades de onda P y onda S, están en el rango asociado a secuencias aluviales (arcillas, arenas, limos) que van desde 0,3 a 0,4 según Cetraro (2007), estos resultados son perfectamente coherentes con los estudios realizados por Rojas (2008) en la ciudad de Caracas donde también la geología corresponde a secuencias aluviales, obteniendo valores comprendidos entre 0,35 a 0,45.
- El coeficiente de Poisson calculado en la zona del Pleistoceno (0,29 hasta 0.32) indican capas más duras y rígidas.
- La capacidad de carga permisible obtenida desde el DownHole para los primeros 15m de profundidad en cada una de las estaciones estudiadas están en el orden de magnitud correspondiente a suelos “Medio/duro”, según la tabla de Tezcan, (2006).

RECOMENDACIONES

- Es recomendable realizar un estudio más detallado en la zona correspondiente a la zona del Pleistoceno en la Formación Guatire, para obtener mayor información sobre el comportamiento de las ondas de corte en sedimentos de este tipo.
- Utilizar una fuente en la que pueda controlarse la frecuencia de energía aplicada ya sea para altas o bajas frecuencias, para en este caso obtener mayor información en la curva de dispersión de las ondas Rayleigh.
- Aplicar otros métodos geofísicos, como el método de Sondeo Eléctrico Vertical o TDEM (Time Domain Electromagnetics Sounding) a lo largo de la transecta, que permitan dar un poco más de información sobre el comportamiento en profundidad de la zona y hacer una estimación de qué tipo de material se encuentra presente.

REFERENCIAS

- Andrus, R.D. and Stokoe, K.H., II, 2004, "Guide for Shear-Wave-Based Liquefaction Potential Evaluation" Earthquake Spectra, Vol. 20, No. 2, pp. 285-305.
- Barton, N., 2006. Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation And Anisotropy (Hardcover), CRC Press.
- Barton, N. (2007) "Near-surface gradients of rock quality, deformation modulus, Vp and Qp to 1 Km depth" EAGE, Technical Article, First Break, Vol. 25, October, 2007.
- Cataldi, A., Schmitz, M. "Determinación de las velocidades de propagación de las ondas de corte – parámetros Vs30, VsP, Vs500, y parámetros dinámicos – con métodos sismológicos en Caracas". Conferencia 50 Aniversario Sociedad Venezolana de Geotecnia. (2008)
- Código Geológico de Venezuela. 2009. PDVSA-Intevp. Disponible en Internet: <http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm>
- COVENIN 1756-98. "Edificaciones sismorresistentes". Fondonorma, Caracas, 113 p. (2001).
- Cuadra, P. 2007. Aplicación de técnicas de vibraciones ambientales: Análisis de microtremores y vibraciones naturales, para la caracterización de sitio. Proyecto de Grado, Universidad Simón Bolívar.
- González de Juana, C. 1980. Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas. Ediciones FONINVE. Caracas, Venezuela.
- Ho Cha, Y, Kang, J. (2006). "Application of linear-array microtremor surveys for rock mass class classification in urban tunnel design". Butsuri-Tansa, 59, Exploration Geophysics, 37, Pag. 108-113.
- INAZAKI, T., "Relationship between S-Wave Velocities and Geotechnical Properties of Alluvial Sediments". Public Works Research Institute, Tsukuba, JAPAN

- Kanai K. Tanaka T., 1961. "On microtremors, VIII". Bull. Earthq. Res. Inst.39.
- Kobayashi, H., K. Seo and S. Midorikawa (1986). "Estimated strong ground motions in the Mexico city due to the Michoacán, Mexico earthquake of September 19, 1985 based on characteristics of microtremor". Part 2, Report on seismic microzoning studies of the Mexico earthquake of September 19, 1985, The Graduate School of Nagatsuta, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan.
- Jones, R.B.; "In-situ measurement of the dynamic properties of soil by vibration method". Geotechnique 8 (1), pp 1-21.
- Lermo, J y Chavez-García, F. 1994. "Are Microtremors useful in site response evaluation?". Bulletin of the Seismological Society of America. Volumen 83. p: 1574-1594.
- Linares, G. 2005. Introducción y aplicación del método de sísmica de microtremores en áreas urbanas. Informe final de Cursos de Cooperación, Universidad Simón Bolívar.
- Louie, J. 2001. "Refraction Microtremor (ReMi) field tutorial 30-meter shear velocity with two hours effort". Optim LLC.
- Louie, J. 2001. Faster, Better: Shear-Wave velocity to 100 meters depth from Refraction Microtremor Arrays. Bulletin of Seismological Society of America, 91: 347-364.
- NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. Edition 2003.
- Noda, F. 2008. Estudio geofísico a lo largo de la ruta del ferrocarril Caracas-Guarenas-Guatire. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Universidad Central de Venezuela.
- Pacheco, D. "Estudio Geofísico integrado de la ciudad de Carupano Edo. Sucre aplicando métodos gravimétricos y ruido sísmico ambiental". Trabajo especial de Grado. Universidad central de Venezuela (2008).

- Redpath B. 1973, Seismic refraction exploration for engineering Site Investigations, Technical Report E-73-4, U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, Explosive Excavation Research Laboratory Livermore, California.
- Skrainka, J. “Estudio comparativo de Vs utilizando métodos Geofísicos y Geotécnicos en la zona de Guarenas-Guatire”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Simón Bolívar (2009).
- Rojas, S. “Sísmica de refracción y de microtemores para caracterización de parámetros dinámicos superficiales en Caracas”. Trabajo de Grado, Universidad Simón Bolívar. Caracas. (2008).
- Salvador Lazcano Díaz del Castillo, 2007. “Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie”, México, p: 19 – 20.
- Santamarina, J. C., K. A. Klein, A. F. Moheb. Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring. John Wiley & Sons, 2001.
- Stokoe II, K., 2007 Field Seismic Testing in Geotechnical Earthquake Engineering, in Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Volume 6, Chapter 7.
- Stokoe, K. H. and Woods, R. D. (1972) In situ Shear Wave Velocity by Cross-Hole Method, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 98, No. (SM5), 443–460.
- Tezcan, S, A. Kecely y Z. Ozdemir. 2006. “Allowable bearing capacity of shallow foundations based shear wave velocity”. Geotechnical and Geological Engineering. Volumen 24. p: 203-218