

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE ESTUDIOS DE RUIDO SÍSMICO  
AMBIENTAL, EN EL ESTE DE LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO, EDO.  
ZULIA.**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Bra. Ericka G. Rivero H.  
Para optar al título de  
Ingeniera Geofísica

Caracas, 2016

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE ESTUDIOS DE RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL, EN EL ESTE DE LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO, EDO. ZULIA.**

Tutor Académico: Prof. Jesús González

Tutor Industrial: Ing. Luis Yegres

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Bra. Ericka G. Rivero H.  
Para optar al título de  
Ingeniera Geofísica

Caracas, 2016

Caracas, Mayo del 2016

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bra. **Ericka Giovana Rivero Hernández**, titulado:

**Caracterización geofísica mediante estudios de ruido sísmico ambiental, en el este de la cuenca del lago de Maracaibo, Edo. Zulia.**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas del autor, lo declaran **APROBADO**.



Ing. Vincenzo De Lisa  
Jurado



Prof. Jesús González  
Tutor



Prof. Michel Schmitz  
Jurado

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Central de Venezuela por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de crecer y aprender en ella. A todos los profesores que dejaron una enseñanza en mí y que a pesar de las dificultades que representa serlo, aún continúan regalándonos sus conocimientos.

A mis tutores, Jesús González, gracias por tu apoyo, tu tiempo y tu disposición en ayudarme siempre que lo necesité y Luis Yegres mil gracias por siempre estar dispuesto a guiarme, ayudarme y enseñarme siempre que fue posible y además por siempre exigir lo mejor de mí.

A FUNVISIS, especialmente al profesor Michael Schmitz por lograr que este proyecto sea posible y contar siempre con su apoyo y conocimientos. Gracias a todos los que colaboraron, estuvieron pendientes y a disposición en este proyecto como Víctor Rocabado, Javier Sánchez y Pedro Medina.

A Camilo Aloisi y Manuel Rincón de PDVSA Occidente por su disposición y colaboración con el proyecto.

A mis padres, por los cuales le agradezco siempre a Dios por tenerlos, por siempre creer en mí, por no cuestionarme ni rechazarme por ninguna de mis decisiones, al contrario, siempre me apoyaron, guiaron y han estado conmigo en todo momento. A mi hermana, el mejor regalo que me han dado mis padres, gracias por tanto, porque mucho de lo que soy y de lo que tengo es gracias a ella, los amo.

Al resto de mi familia, ¡Gracias! Porque aunque quisiera nombrarlos a todos son muchos, pero cada uno de ustedes son parte de lo que soy y siempre he podido contar incondicionalmente con todos y siempre seguiré agradeciendo a Dios por la hermosa familia que me regaló.

A personas muy importantes en mi vida como Daniel Pérez, quien siempre ha creído incondicionalmente en mí, me ha ayudado y dado fuerzas en todo momento, gracias por estar en mi vida; a mis amigas Sharon y Valeria quienes han sido parte de muchas etapas de mi vida, no siempre presentes pero nunca ausentes, las quiero mucho.

A mis amigas que me regaló mi querida escuela, Gabriela y Fadhia, gracias por el apoyo y compañía durante la carrera mis casi colegas. Al resto de mis compañeros en la escuela de Geofísica como María Beatriz, Alejandra, Braulimar, Portas, Sebastián, Luis, Aaron, Daniel y muchos otros, gracias por siempre poder contar con ustedes.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
CAPÍTULO I .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	3
1.4. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	3
1.5. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
CAPÍTULO II .....	7
MARCO GEOLÓGICO .....	7
2.1. EVOLUCIÓN DE LA CUENCA DE MARACAIBO .....	8
2.1.1. Pre-cretácico .....	8
2.1.2. Cretácico .....	9
2.1.3. Paleógeno .....	10
2.1.4. Neógeno .....	10
2.1.5. Cuaternario: .....	11
2.2. MARCO ESTRUCTURAL REGIONAL .....	12
2.2.1. Falla Pueblo Viejo .....	13
2.2.2. Falla Burro Negro .....	14
2.3. GEOLOGÍA LOCAL .....	15
2.3.1. Formación La Puerta .....	17
2.3.2. Formación Isnotú .....	17
2.3.3. Formación Lagunillas .....	17
2.3.4. Formación La Rosa .....	17
2.3.5. Formación Icotea .....	18
2.3.6. Formación Paují .....	18
2.3.7. Formación Misoa .....	19
2.3.8. Formación Guasare .....	19

2.3.9. Formación Mito Juan .....	19
2.3.10. Formación Colon .....	20
2.3.11. Grupo Cogollo .....	20
2.3.12. Formación La Luna .....	20
CAPÍTULO III .....	21
MARCO TEÓRICO.....	21
3.1. ONDAS RAYLEIGH (R).....	21
3.2. RUIDO SÍSMICO .....	21
3.3. RANGOS DE FRECUENCIAS ASIGNADOS AL RUIDO SÍSMICO .....	22
3.4. MÉTODOS DE ONDAS SUPERFICIALES.....	23
3.4.1. Métodos activos.....	23
3.4.2. Métodos pasivos .....	23
3.5. MÉTODO NAKAMURA .....	24
3.6. ESTIMACIÓN DE ESPESORES SEDIMENTARIOS.....	26
3.7. ELIPTICIDAD DE LA ONDA RAYLEIGH.....	26
3.8. INVERSIÓN.....	27
3.9. ALGORITMO DEL VECINDARIO (NEIGHBORHOOD ALGORITHM). .....	28
3.10 RELACIÓN DE POISSON ( $\sigma$ ) .....	28
CAPÍTULO IV .....	30
MARCO METODOLÓGICO.....	30
4.1. REVISIÓN Y RECOPIACIÓN DE MATERIAL BIBLIOGRÁFICO. ....	30
4.2. ORGANIZACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE CAMPO .....	30
4.3. ETAPA DE ADQUISICIÓN.....	30
4.3.1. Equipos de adquisición.....	31
4.3.2. Parámetros de adquisición.....	32
4.3.3. Consideraciones de adquisición.....	32
4.4. METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO.....	35
4.4.1. Obtención de la relación espectral H/V .....	38
4.4.2. Estimación de Vs .....	42
4.4.3. Calculo de la elipticidad de la curva.....	43

4.4.4. Inversión de la curva .....	44
CAPÍTULO V .....	46
RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	46
5.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	46
5.2. COCIENTES ESPECTRALES H/V .....	47
5.3 MAPAS DE ISOPERÍODOS Y PROFUNDIDAD DE LA BASE DE LAS CAPAS .....	54
5.4. INVERSÓN DE LA CURVA DE ELIPTICIDAD .....	61
CAPÍTULO VI .....	66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69
APÉNDICE A .....	74
APÉNDICE B .....	81
APÉNDICE C .....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Mapa de ubicación del área de estudio .....	4
Figura 2.1. Mapa geológico del área de estudio (Hackley <i>et al.</i> , 2006) .....	7
Figura 2.2. Distribución de las rocas Jurásicas en Venezuela, sierra de Perijá (1), como parte del basamento en el subsuelo de la cuenca de Maracaibo (2), en los Andes (3), en el subsuelo de las cuencas de Barinas- Apure y Oriental, serranía del Interior (4)( (Yoris y Ostos, 1997). .....	9
Figura 2.3. Marco geológico regional para la sedimentación en Venezuela (cuencas de Maracaibo, Falcón, Barinas-Apure y Oriental) durante el Mioceno- Plioceno (Yoris y Ostos, 1997). .....	11
Figura 2.4. Mapa de ubicación del sistema regional de fallas en la cuenca de Maracaibo (tomado de Alarcón, 2007) .....	12
Figura 2.5. Sección O-E de la cuenca de Maracaibo (tomado de Yoris y Ostos 1997). .....	13
Figura 2.6. Elementos estructurales mayores, que afectan la cuenca de Maracaibo (tomado y modificado de Pérez, 2009) .....	14
Figura 3.1. Esquema del problema inverso (Humire, 2013).....	28
Figura 4.1. Esquema de metodología de investigación.....	30
Figura 4.2. Digitalizador modelo 130-B (REF TEK, 2011).....	31
Figura 4.3. Sismómetro REF TEK modelo 151B (REF TEK, 2011) .....	31
Figura 4.4. Nivelación del sensor .....	34
Figura 4.5. Control de la señal.....	35
Figura 4.6. Carpetas de los datos descargados de la memoria.....	36
Figura 4.7. Visualización de la señal con programa RT_View. ....	36
Figura 4.8. Archivo .BAT .....	37
Figura 4.9. Carpeta de la estación RCOLM20.....	37
Figura 4.10. Rutina Reftek-to-SAF (Rocabado, 2012).....	38
Figura 4.11. Ventana para abrir el archivo .SAF.....	38
Figura 4.12. Ventana de <i>mean value</i> .....	39
Figura 4.13. Filtro Butterworth pasa banda entre 0,05 y 15 Hz.....	40
Figura 4.14. H/V toolbox .....	41
Figura 4.15. Ventana <i>Time</i> en <i>Geopsy</i> .....	41
Figura 4.16. Mapa de ubicación de los pozos (suministrado por PDVSA.....	43

Figura 4.17. Curva de elipticidad de la estación RCOLM20.....	44
Figura 4.18. Carga de datos en <i>Dinver</i> .....	44
Figura 4.19. Ingreso de parámetros .....	45
Figura 5.1. Histograma de frecuencia de los periodos.....	47
Figura 5.2. Picos definidos correspondientes a la estación RCOLM010 .....	48
Figura 5.3. Picos múltiples correspondientes a la estación RCOLM046. ....	49
Figura 5.4. Mapa de ubicación de los perfile .....	49
Figura 5.5. Relación entre las amplitudes H/V y la geometría de la cuenca del perfil 1.....	50
Figura 5.6. Relación entre las amplitudes H/V y la geometría de la cuenca del perfil 2.....	51
Figura 5.7. Relación entre las amplitudes H/V y la geometría de la cuenca del perfil 3.....	51
Figura 5.8. Relación entre las amplitudes H/V y la geometría de la cuenca del perfil 4.....	52
Figura 5.9. Relación entre las amplitudes H/V y la geometría de la cuenca del perfil 5.....	53
Figura 5.10. Relación entre las amplitudes H/V y la geometría de la cuenca del perfil 6.....	53
Figura 5.11. Mapa de isoperíodos correspondiente a la primera capa. ....	54
Figura 5.12. Estructura generalizada de la falla Pueblo Viejo (PDVSA-Intevep, 1997) .....	55
Figura 5.13. Mapa de profundidad de la base correspondiente a la primera capa.....	56
Figura 5.14. Mapa de isoperíodos correspondiente a la segunda capa.....	57
Figura 5.15. Mapa de profundidad de la base correspondiente a la segunda capa. ....	58
Figura 5.16. Cuenca Post Eocena (Requena y Zambrano, 2008). ....	58
Figura 5.17. Mapa de isoperíodos correspondiente a la tercera capa. ....	59
Figura 5.18. Mapa de profundidad de la base correspondiente a la tercera capa. ....	60
Figura 5.19. Curva de elipticidad y modelo 1D de la estación RCOLM17 .....	61
Figura 5.20. Perfil 1 a partir de inversión de elipticidad .....	62
Figura 5.21. Perfil 2 a partir de inversión de elipticidad .....	63
Figura 5.22. Perfil 3 a partir de inversión de elipticidad .....	64
Figura 5.23. Perfil 4 a partir de inversión de elipticidad .....	64
Figura 5.24. Perfil 5 a partir de inversión de elipticidad .....	65
Figura 5.25. Perfil 6 a partir de inversión de elipticidad .....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1. Columna estratigráfica de la cuenca del lago de Maracaibo. (modificado de Calderón, 2016) .....	16
Tabla 3.1. Fuentes de ruido ambiental en función de la frecuencia.....	23
Tabla 4.1. Tiempo de grabación de acuerdo a la frecuencia esperada (SESAME, 2004) .....	33
Tabla 5.1. Datos de la estadística descriptiva .....	46

Rivero H. Ericka G.

**CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE ESTUDIOS DE RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL, EN EL ESTE DE LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO, EDO. ZULIA.**

**Tutor académico: Prof. Jesús González. Tutor industrial: Ing. Luis Yegres.  
Tesis. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geofísica.  
2016, 99p.**

**Palabras claves:** técnica de Nakamura, sísmica (ruido), elipticidad (inversión)

**Resumen.** Desde el 2012, el proyecto GIAME (Geociencia Integral de Los Andes de Mérida) realiza investigaciones multidisciplinarias de las estructuras más importantes en el contexto geológico del Occidente de Venezuela, como lo son el orógeno Andino, la cuenca Barinas-Apure y la cuenca del lago de Maracaibo; mediante la integración de distintos métodos geológicos y geofísicos. Aunado a esto, se pretende implementar el uso de métodos no convencionales en el estudio de la cuenca del lago de Maracaibo como la técnica de Nakamura (H/V), con el objetivo de caracterizar y estimar el espesor sedimentario, mediante la obtención de los periodos de vibración del subsuelo. Se aplicó esta técnica a través de mediciones de ruido sísmico ambiental en un total de 33 estaciones separadas aproximadamente por 5 km. El procesamiento fue realizado mediante el programa *Geopsy*, con el cual se calculó la relación espectral H/V.

A partir de los cocientes espectrales H/V se obtuvieron cinco picos, el primero entre 0,1 a 1,8 s, luego de 1,8 a 3,4 s, el tercero entre 6,7 a 8,4 s, de 11,7 a 13,3 s el cuarto y finalmente de 16,7 a 18,3 s, de los cuales solo tres se tomaron como información confiable para el estudio debido a la dispersión en los dos últimos picos, asociando cada uno de ellos a un cambio litológico y a posibles formaciones geológicas. Se generaron mapas de periodos y profundidades, además de perfiles que permitieron asociar los periodos predominantes con la estratigrafía de la zona.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La determinación de las profundidades y las propiedades elásticas de los depósitos sedimentarios es de gran importancia en varios campos de la geociencia ya que permite modelar la respuesta sísmica de las cuencas sedimentarias, generando información de importancia como el riesgo sísmico y de posible utilidad en la búsqueda de recursos naturales.

La investigación mediante diferentes técnicas que utilizan ruido sísmico para caracterización de cuencas en la exploración geofísica ha experimentado un gran desarrollo durante las últimas décadas a partir de la popularización del trabajo de Nakamura (1989) debido a su fiabilidad en los resultados, rapidez y economía en su ejecución.

En Venezuela, a partir del año 1994 se inician los primeros trabajos de mediciones de ruido ambiental en la ciudad de Caracas (Abekiet *al.* 1995) donde se logró establecer una relación directa entre los valores de períodos obtenidos y el espesor de sedimentos. La técnica se ha implementado en diversas ciudades del país, obteniendo resultados alentadores en diferentes ambientes sedimentarios, tanto en sedimentos blandos como en Cumaná (Abekiet *al.*, 1998a) y Cariaco (González et al., 2004), así como en cuencas con una mayor profundidad de sedimentos como en Caracas (Abeki et al., 1998b) hasta de 350 m de profundidad y en el estado Vargas (Romero *et al.*, 2006) con profundidades aproximadas de 125 m.

El proyecto GIAME (Geociencia Integral de los Andes de Mérida) desarrollado por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Petróleos de Venezuela (PDVSA), la Universidad Central de Venezuela (UCV) y la Universidad de los Andes (ULA) pretende realizar un estudio en las cuencas sedimentarias aledañas con los

Andes venezolanos como lo son la cuenca de Barinas-Apure y la cuenca de Maracaibo, cuyos espesores sedimentarios son de aproximadamente 5 kilómetros (Yoris y Ostos, 1997) y 10 kilómetros (PDVSA– INTEVEP, 1997) respectivamente.

Se propone emplear el método Nakamura en la zona este de la cuenca del lago de Maracaibo, cuyo espesor sedimentario es mucho mayor a las cuencas urbanas estudiadas con este método, para así determinar el período de vibración del suelo y posteriormente elaborar mapas de isoperiodos y modelos que servirán para caracterización geofísica a través de mediciones de ruido ambiental, que finalmente contribuyen a la exploración de las cuencas petrolíferas de la zona y a la precisión en el cálculo de la amenaza sísmica de la región.

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar la capa sedimentaria del área este de la cuenca de Maracaibo, mediante el estudio de ruido sísmico ambiental utilizando el método de Nakamura.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el período de vibración del suelo, a partir de mediciones de ruido ambiental.
- Estimar espesores de sedimentos a partir de la medición de períodos de vibración del suelo.
- Generar mapas de períodos de vibración del suelo mediante análisis H/V.
- Generar mapas de profundidades de las capas de sedimentos.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Existen diferentes métodos de prospección geofísica aplicados en cuencas profundas como en la cuenca del lago de Maracaibo, sin embargo, el proyecto GIAME desde el 2014 ha dedicado parte de la investigación a la aplicación de métodos económicos y rápidos, tanto en dicha cuenca como en la cuenca Barinas-Apure. Por lo tanto, como continuación de estos estudios, en la costa Oriental del lago de Maracaibo (COLM) se realizó la presente investigación utilizando la técnica de Nakamura o H/V con la finalidad de obtener una caracterización del subsuelo mediante la obtención de periodos de vibración que indiquen los altos contrastes geológicos que en él se encuentren y así generar un aporte no solo en microzonificación sísmica o geotecnia, sino que también sea de utilidad en el área investigativa y petrolera.

### **1.4. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

La zona de estudio se encuentra ubicada en la costa oriental del lago de Maracaibo (COLM) entre los estados Falcón y Lara al este y el lago de Maracaibo al oeste, específicamente entre las poblaciones de Cabimas y Bachaquero (figura 1.1).

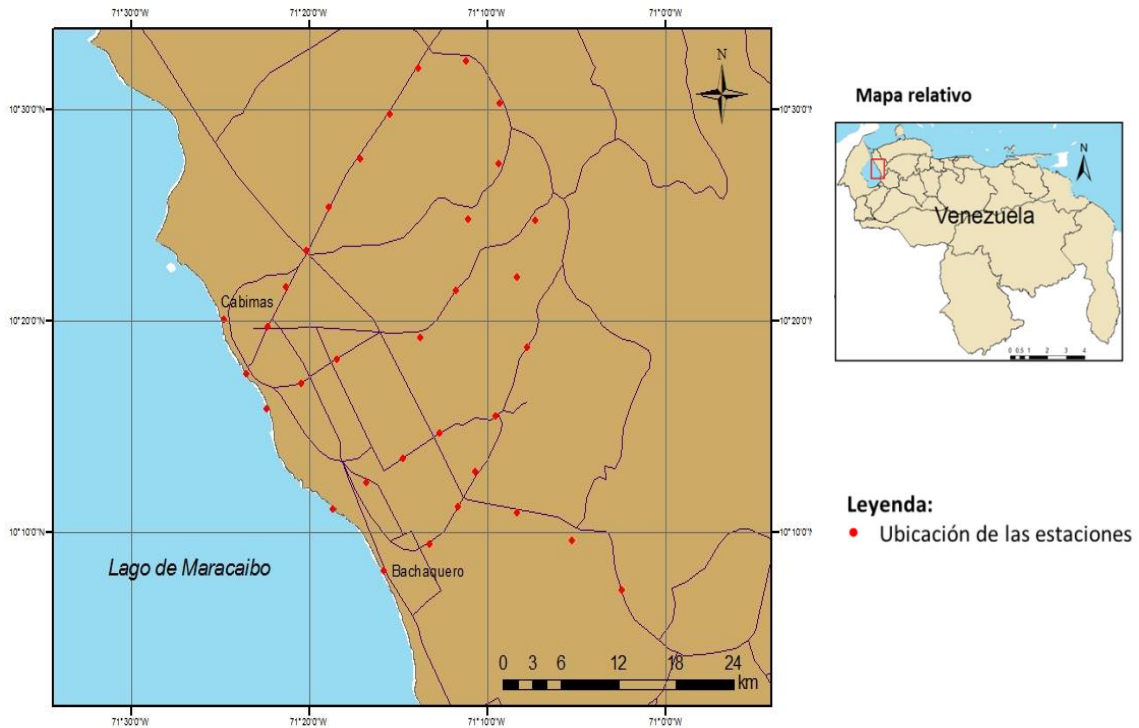


Figura 1.1. Mapa de ubicación del área de estudio

## 1.5. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

El método de Nakamura ha sido utilizado en numerosos estudios para caracterización, respuesta de sitio y estudios de microzonificación, sin embargo, a partir del proyecto GIAME nace la iniciativa de caracterizar cuencas sedimentarias mediante este método. Por lo que a partir del 2014 se inician los estudios en cuencas aledañas a la Cordillera de los Andes como lo son la cuenca de Maracaibo y la cuenca Barinas-Apure:

- *Caracterización geofísica del área noroeste de la cuenca Barinas-Apure (Estado Barinas) mediante el análisis de microtremores (método de Nakamura) (García, 2014)*

Empleando el método Nakamura, se estimó el espesor sedimentario y definió la geometría, mediante la adquisición en 45 estaciones distribuidas en tres perfiles en dirección NO-SE, donde se obtuvo el espectro de frecuencias en función de la amplitud H/V logrando definir tres picos de período fundamental (0-2; 2-4 y 5-8 s) con los cuales fueron estimadas las profundidades correspondientes a cada capa. Obteniendo espesores entre 112 y 505 m para la primera capa, donde los mayores espesores se ubicaron hacia el

sur, mientras que para la tercera capa, se obtuvieron espesores entre 2394 y 3777 m; ubicándose los mayores espesores en el pie de monte Andino y hacia el noroeste del estado Barinas.

- *Caracterización geofísica del área sureste de la cuenca de Maracaibo, mediante la adquisición de ruido sísmico ambiental utilizando el método de Nakamura (Daza, 2014)*

Se caracterizó y estimó el espesor sedimentario, mediante la obtención de los periodos fundamentales del suelo, a través de mediciones de ruido sísmico ambiental. El área de estudio abarcó una poligonal de 2.100 km<sup>2</sup>, en el borde sureste del lago de Maracaibo. Se observó en los cocientes espectrales H/V la presencia de tres picos, por lo que se asoció cada pico a un cambio litológico o capa. El tercer pico no fue visible en todas las estaciones, por lo que no se tomó en cuenta como un tercer espesor. El mapa de espesores de la primera capa muestra una tendencia general entre 0,10 a 0,60 km, donde los valores máximos se observaron hacia el área noreste, correspondiente a la localidad de Bachaquero, de 1,20 hasta 1,50 km, y de igual manera hacia el suroeste, sobre las poblaciones de Bobures y Boscán, se aprecia un incremento del espesor entre 1,3 a 1,6 km.

- *Caracterización geofísica mediante estudios de ruido sísmico ambiental, en el área suroeste de la cuenca de Maracaibo (Macero, 2014)*

Contempló una evaluación geofísica mediante el estudio de ruido sísmico ambiental, a través del método de Nakamura con los valores adquiridos en el área suroeste de la Cuenca de Maracaibo. Se observó que los períodos registrados se encuentran comprendidos entre 0.13 y 9.65 s, con tres subpoblaciones bastante marcadas dentro de este rango, indicando el contraste entre los diversos materiales presentes en el área. Los espesores determinados a partir de dichos períodos, presentan un rango que oscila desde los 35 m hasta los 5507 m dentro de la zona de estudio.

- *Caracterización geofísica del área suroeste de la cuenca Barinas – Apure a partir de la aplicación del método de Nakamura (Laguado, 2015)*

Estimó el espesor sedimentario, mediante la obtención de los periodos fundamentales del suelo, a través de mediciones de ruido sísmico ambiental en la zona norte del Estado Barinas, adquiriendo los datos en un total de 60 estaciones de distancia aproximada 5 km, ubicadas entre perfiles paralelos y perpendiculares a la cordillera, de donde se obtuvieron tres picos de período fundamental que determinan el contraste de impedancia acústica entre capas, con rangos entre 0,5 y 1,9 s para la primera capa, entre 2,2 y 3,8 s para la segunda capa y entre 6,3 y 10,25 s la tercera capa. Para la primera capa se obtuvieron espesores con un rango entre 130 y 470 m de espesor, para la segunda capa en un rango entre 800 y 1400m. Finalmente, para el tercer pico, se concentran los mayores espesores en el piedemonte andino y se observa un adelgazamiento progresivo, con valores entre 2760 y 4490 m.

## CAPÍTULO II

### MARCO GEOLÓGICO

La planicie del lago de Maracaibo está configurada por el piedemonte de Perijá y de la sierra de Cojoro al oeste, por el piedemonte de Los Andes venezolanos al sureste y por las estribaciones de la serranía de Trujillo al noreste, formando el contorno del lago de Maracaibo. Casi toda la cobertura de la planicie del lago son terrenos cuaternarios y únicamente en el espesor occidental del lago se encuentran afloramientos de rocas del Ciclo Terciario Inferior. La historia reciente de toda la depresión es de relleno progresivo y continuado en casi toda su extensión, provocado por la erosión activa de las cordilleras circundantes y la poca capacidad de arrastre de los detritus al caer en aguas del lago (González de Juana *et al.*, 1980).

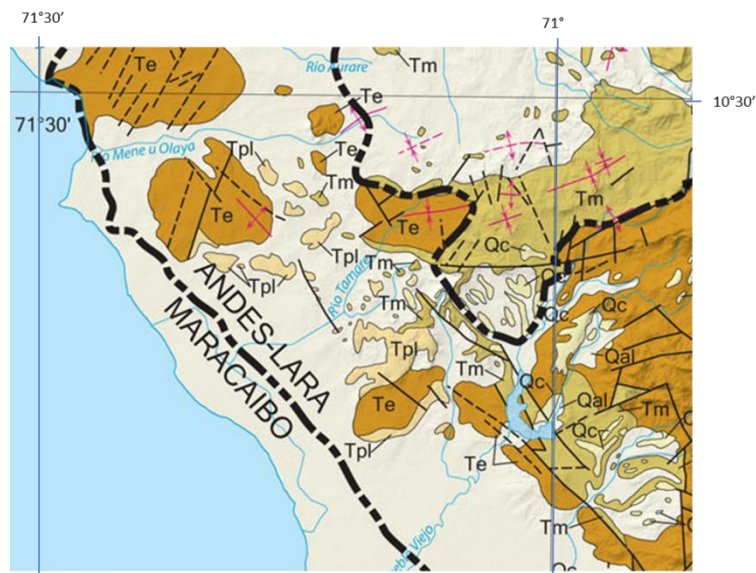


Figura 2.1. Mapa geológico del área de estudio (Hackley *et al.*, 2006)

## **2.1. EVOLUCIÓN DE LA CUENCA DE MARACAIBO**

### **2.1.1. Pre-cretácico:**

Debido a los procesos tectónicos sufridos por el norte de la placa Suramericana a lo largo de su historia, los cuerpos precámbricos son de dos clases: alóctonos y autóctonos. Los terrenos autóctonos se localizan en el escudo de Guayana y como basamento de las cuencas paleozoicas a cenozoicas al sur de la falla de Apure. Los terrenos alóctonos iniciaron su adosamiento a Suramérica durante el Paleozoico Temprano.

La distribución de los terrenos alóctonos que se soldaron al autóctono del Paleozoico Inferior, durante el Ordovícico - Silúrico. Aquellos donde hay rocas paleozoicas y que se adosaron en el Paleozoico Inferior, se reconocen ahora como parte del basamento de los terrenos incorporados durante la historia tectónica del Caribe, como el constituyente del cinturón orogénico del Paleozoico Inferior al norte de la falla de Apure y como parte del basamento de los Andes y de la cuenca del lago de Maracaibo, el cual está representado por rocas metasedimentarias ordovícicas, que también afloran en los Andes (Yoris y Ostos, 1997).

Durante el Triasico en Venezuela, la rotura o "rifting" de Pangea produjo varias estructuraciones importantes que posteriormente influyeron en la evolución de las cuencas sedimentarias venezolanas. Dentro de Venezuela continental, la apertura del Proto-Caribe indujo el desarrollo de valles de extensión o grábenes (figura 2.2) con una tendencia noreste, en los que se incluyen los grábenes de Apure-Mantecal y Espino, así como también los grábenes de los Andes y Perijá, y el ubicado en el lago de Maracaibo (Yoris y Ostos, 1997).

Todos estos grábenes fueron rellenos durante el Jurásico por sedimentos continentales tipo "capas rojas", volcánicas de diversa índole y eventualmente clásticos y calizas de invasiones marinas (Yoris y Ostos, 1997).

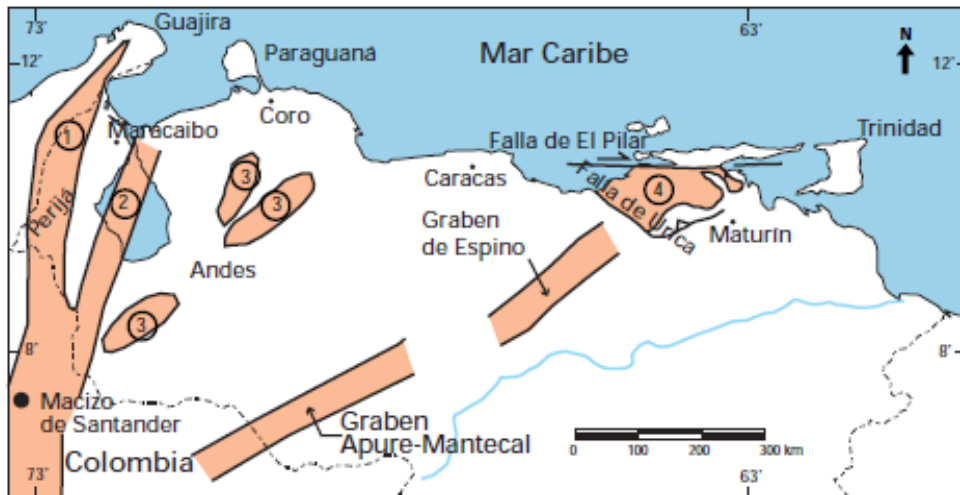


Figura 2.2. Distribución de las rocas Jurásicas en Venezuela, sierra de Perijá (1), como parte del basamento en el subsuelo de la cuenca de Maracaibo (2), en los Andes (3), en el subsuelo de las cuencas de Barinas- Apure y Oriental, serranía del Interior (4) (Yoris y Ostos, 1997).

### 2.1.2. Cretácico:

La sedimentación fue controlada en su inicio por el sistema de fallas de los grábenes jurásicos, como se puede evidenciar en los espesores de los clásticos arenosos de la formación Río Negro, los cuales varían desde más de dos kilómetros en el surco de Machiques, hasta unos pocos metros en algunas localidades del flanco Norandino (Yoris y Ostos, 1997). Posteriormente, se desarrollan ambientes marinos de escasa profundidad, al mismo tiempo, la transgresión progresiva sobre las áreas como la plataforma de Maracaibo y el actual borde noreste de Los Andes venezolanos, durante el Aptiense inferior y medio, se estabilizó y el grupo Cogollo (carbonático) se depositó en un extenso mar sobre Venezuela Occidental.

Se genera una máxima transgresión y anoxia estimada entre el Turoniense y el Campaniense, responsable de la sedimentación de calizas, lutitas y ftanitas ricas en materia orgánica generando las formaciones La Luna, Navay y Querecual, siendo estas las rocas madre por excelencia en las cuencas petrolíferas venezolanas (Yoris y Ostos, 1997).

El Cretácico Tardío en Venezuela finaliza durante el Maastrichtiense con unidades regresivas respecto a los ambientes más profundos de la roca madre.

### **2.1.3. Paleógeno:**

En los comienzos del Paleoceno, Venezuela Occidental sufrió finalmente el efecto de la colisión entre la placa de Nazca (océano Pacífico) y el occidente Colombiano. Al norte y oeste de la cuenca de Maracaibo al inicio del Paleoceno, la formación Guasare representa ambientes más someros y que reflejan una mayor lejanía de los frentes de deformación, previamente a la instalación de los ambientes paludales costeros (Yoris y Ostos, 1997). Durante el Eoceno, en la cuenca del lago de Maracaibo existió un marco sedimentario complejo que se caracterizó por sistemas deltaicos-estuarinos, fluvio-costeros y marinos, en diferentes ubicaciones geográficas delante de los frentes de corrimiento. Al final de la sedimentación del Eoceno se producen en Venezuela Occidental movimientos tectónicos generalizados que levantan prácticamente toda la zona, a las actuales cordilleras de Perijá y Andes de Mérida; las provincias de surcos hasta las zonas anteriormente cubiertas por mares de poca profundidad, tanto en Barinas como en el lago de Maracaibo, se convirtieron en áreas positivas, intensificándose así la erosión sobre esas áreas. La erosión característica del Eoceno superior continúa sobre grandes extensiones durante el Oligoceno cuyo posible representante se encuentra en la formación Icotea que aparece discordante por debajo de la Formación la Rosa (González de Juana *et al.*, 1980).

### **2.1.4. Neógeno:**

Está signado por importantes períodos de formación de montañas, los cuales son una consecuencia directa de la interacción de las placas del Caribe y Suramérica. El comienzo de la sedimentación miocena en la cuenca del lago de Maracaibo se caracteriza por una transgresión marina de considerable extensión territorial dentro de los límites del lago, pero de duración relativamente corta. Que como base de la trasgresión se encuentra la formación La Rosa representada por un intervalo arenoso conocido como arena de Santa

Bárbara y por encima de esta se encuentra el miembro de lutitas que marcan la extensión máxima de la transgresión (González de Juana *et al.*, 1980). En el Plioceno, la orogénesis en todo el norte de Venezuela terminó de definir las cuencas petrolíferas actuales y levantó extensas zonas constituyendo el sistema de montañas del Caribe y el ramal de los Andes Venezolanos, el cual separa a las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure (Yoris y Ostos, 1997).

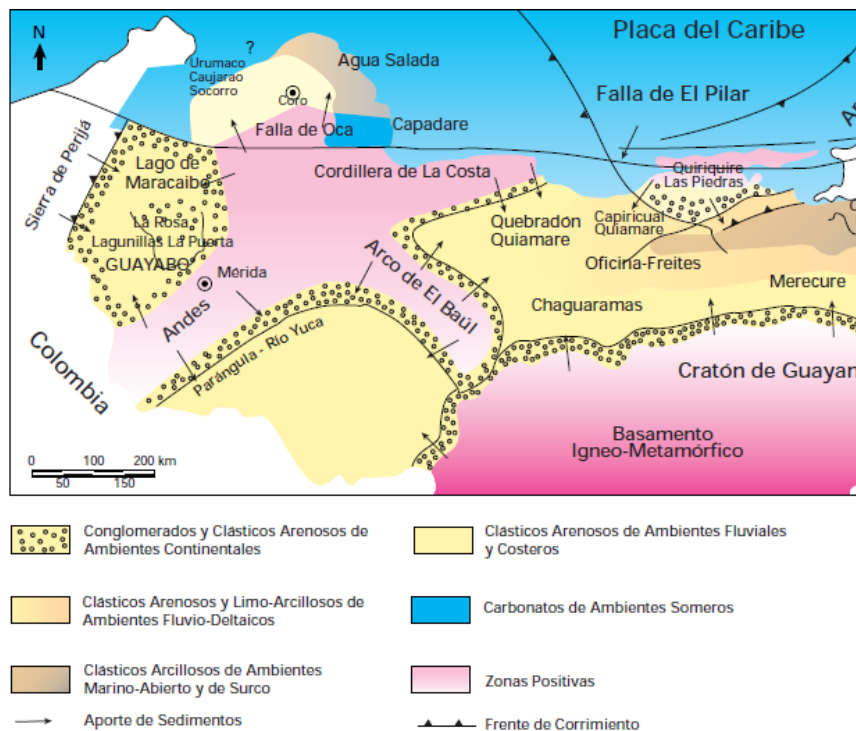


Figura 2.3. Marco geológico regional para la sedimentación en Venezuela (cuencas de Maracaibo, Falcón, Barinas-Apure y Oriental) durante el Mioceno- Plioceno (Yoris y Ostos, 1997).

### 2.1.5. Cuaternario:

El Lago de Maracaibo probablemente estuvo sometido a oscilaciones en su nivel de aguas durante el Pleistoceno, como consecuencia de las glaciaciones que influenciaron las condiciones climáticas. Es probable que el lago, al menos en su parte más profunda, existiera como tal durante la mayor parte del cuaternario. La unidad litológica más joven

se describe como formación El Milagro restringida a la facies arenosa fluvial, considerada del Pleistoceno (González de Juana et al., 1980).

## 2.2. MARCO ESTRUCTURAL REGIONAL

La cuenca del lago de Maracaibo se encuentra limitada por tres grandes fallas: al oeste la falla de Santa Marta, la falla de Oca al norte y la de Boconó al SE, todas con movimiento transcurrente los cuales tienden a generar una serie de fallas antitéticas y sintéticas (figura 2.4)

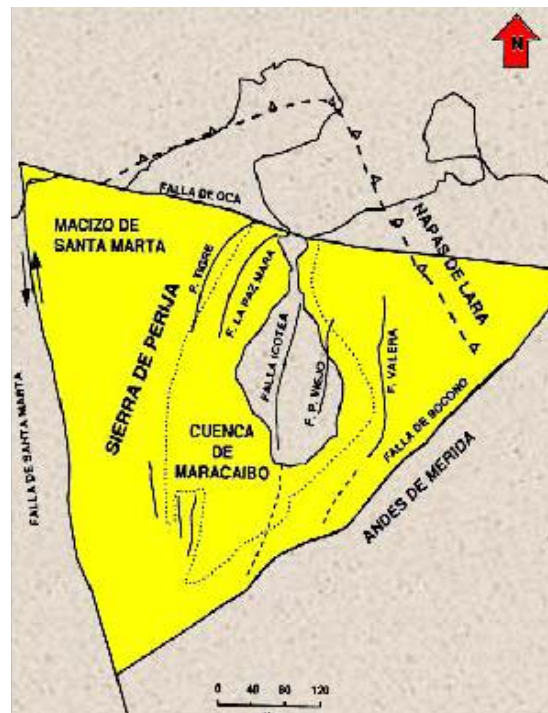


Figura 2.4. Mapa de ubicación del sistema regional de fallas en la cuenca de Maracaibo (tomado de Alarcón, 2007)

La cuenca de Maracaibo es generalmente un sinclinal y contiene más de 7 kilómetros de rocas sedimentarias no metamorizadas del Jurásico Temprano. A su vez forma una depresión topográfica rellena por el lago de Maracaibo (profundidad máxima del agua de 31 m) y está rodeado por los Andes. Se conocen estructuras miocenas de pequeño

relieve, como los sinclinales de Cabimas y Ambrosio, y fallas que cortan el Mioceno, como la falla de Tía Juana en el campo Tía Juana y la falla de Lagunillas en el campo Lagunillas con saltos no mayores de 61 m (Alarcon, 2007).

El levantamiento al norte de los Andes en el Mioceno causó que la cuenca de Maracaibo se convirtiera en un vasto depósito de sedimentos erosionados de las montañas que las rodean. Rocas sedimentarias neógenas en la parte este del lago alcanzan un espesor máximo de 3 km. Por esta razón muchas estructuras del Mesozoico y Terciario Temprano y rocas en la cuenca de Maracaibo están enterradas profundamente como se observa en la figura 2.5 (González, 2007)

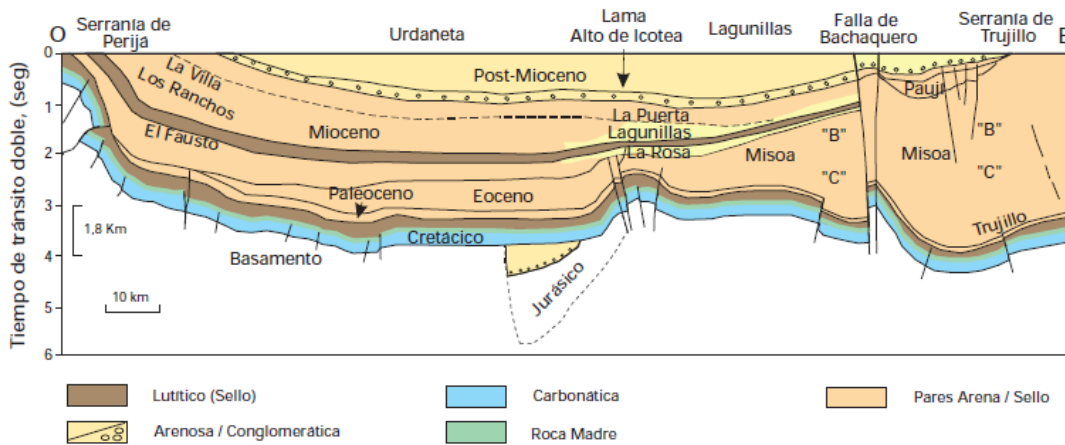


Figura 2.5. Sección O-E de la cuenca de Maracaibo (tomado de Yoris y Ostos 1997).

La actividad tectónica (figura 2.6) en la zona de estudio se encuentra gobernada por:

### 2.2.1. Falla Pueblo Viejo

Es definitivamente una falla activa, de conformidad con varias líneas sísmicas o secciones publicadas, con una longitud mínima de 60 km y anchura de 16 km. Según Murria (1992), la falla tiene una tasa de deslizamiento de 0,02 mm/año y magnitud máxima asociada de 6,5. Esta falla presenta características tectónicas recientes: accidente submeridiano, con movimiento reciente transpresivo (sinistral inverso a inverso sinistral) y levantamiento estructural anticlinal (pop up o

push up) asociado. Se extiende tierra adentro donde aflora hacia el NNE, al menos hasta aproximarse a Cabimas (Zulia), y pudiera terminar en la falla Burro Negro. Asimismo, pareciera prolongarse sin aflorar hasta el sur del lago de Maracaibo (Audemardet *al.*, 2015).

### 2.2.2. Falla Burro Negro

Escalona y Mann (2006) sostienen que la falla de Burro Negro es una falla rumbo deslizante lateral dextral de edad Eoceno ubicada a lo largo del borde este de la cuenca de Maracaibo que separa las rocas menos deformadas, del interior al exterior de la plataforma del oeste de la cuenca (figura 2.6). La longitud aproximada de esta falla es de 100 km, con dirección N45°O y una profundidad de aproximadamente 6 km. Además de esto la zona este de la falla presenta mayor deformación que en la parte oeste, debido al empuje tectónico como consecuencia de la interacción Caribe-Suramérica. Es decir, se puede observar un área plegada de rocas del Eoceno al este, y una cuña clástica estable del Eoceno menos plegada y fallada al oeste (Calderón, 2016)

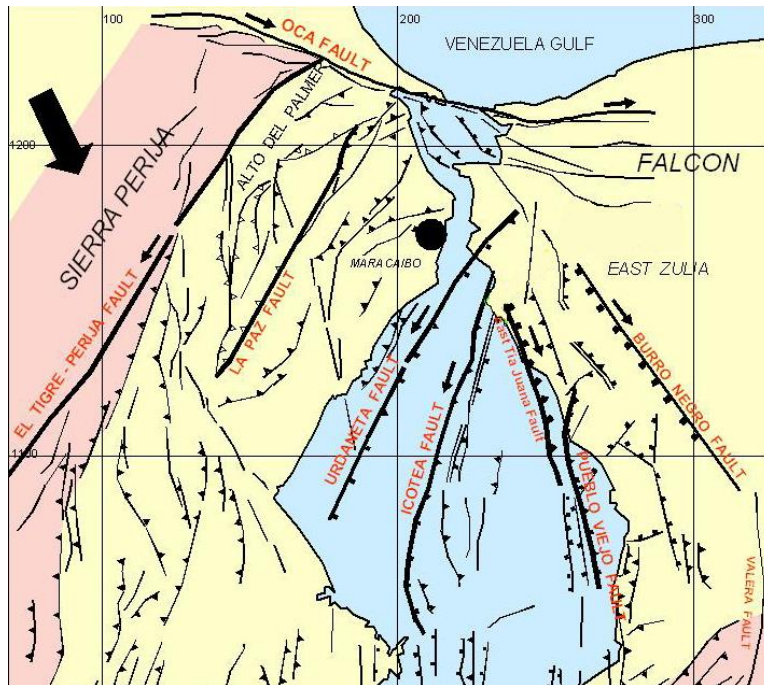


Figura 2.6. Elementos estructurales mayores, que afectan la cuenca de Maracaibo (tomado y modificado de Pérez, 2009)

### **2.3. GEOLOGÍA LOCAL**

En esta sección se muestra una descripción estratigráfica generalizada proveniente del Léxico Estratigráfico (PDVSA Intevep, 2011) correspondiente a las unidades litológicas presentes en el área de estudio. En la tabla 2.1 se ilustra las formaciones depositadas sobre el basamento de la cuenca hasta la actualidad, incluyendo las densidades correspondientes a las formaciones.

Tabla 2.1. Columna estratigráfica de la cuenca del lago de Maracaibo. (modificado de Calderón, 2016)

Columna geológica		Formación	Litología tipo	Densidad promedio (g/cm <sup>3</sup> )			
CENOZOICO	Qr	Holoceno	La Puerta	Arcilitas, limolitas y areniscas.	2,05 - 2,15		
		Pleistoceno	Isnotú	Arcillas y areniscas. Carbón			
	Neógeno	Plioceno	Lagunillas	Areniscas poco consolidadas, arcillas, lutitas y lignitos	2 - 2,2		
		Mioceno	La Rosa	Areniscas arcillosas poco consolidadas. Areniscas.	2,24 - 2,3		
	Paleógeno	Oligoceno		Icotea	Lutitas y areniscas.	2,27 - 2,32	
		Eoceno	Superior	Paují	Lutitas	2,35 - 2,4	
			Medio	Misoa	Lutitas, areniscas, limolitas y calizas.		
			Inferior				
	Paleoceno		Guasare	Calizas glauconíticas. Lutitas, limolitas y areniscas calcáreas y glauconíticas	2,42 - 2,5		
	MESOZOICO	Cretácico	Superior	Maastrichtiense	Mito Juan	Arcillas arenosas y limosas. Calizas y areniscas.	2,52 - 2,66
Campaniense				Colón	Lutitas piríticas, micáceas y glauconíticas. Margas		
Santoniense				La Luna	Calizas y lutitas calcáreas.		
Coniaciense							
Turnoniense							
Cenomaniense							
Inferior			Albiense	Maraca	Areniscas glauconíticas y calcáreas. Calizas bioclásticas, margas y lutitas.		
				Lisure	Areniscas y calizas glauconíticas. Lutitas arenosarcillosa y calizas lutíticas.		
			Aptiense	Apón	Calizas, lutitas, margas, dolomitas y calcarenitas.		
			Barremiense	Río Negro	Areniscas conglomeráticas cuarzosas y feldespáticas, arcillas y lutitas.		
			Neocomiense				
PRE-CRETÁCICO			La Quinta	Toba vítrea, areniscas conglomeráticas y calizas.	2,7 - 2,8		
			Mucuchachí	Pizarras limosas, carbonosas y filíticas. Areniscas. Pirita.			

### **2.3.1. Formación La Puerta**

Edad: Mioceno Tardío

Se subdivide en tres miembros: Poro, Playa y Timoteo, en secuencia ascendente. El inferior consiste de arcillas abigarradas rojas y grises; el intermedio, de arenas grises, subgrauvacas y arcillas, y el superior, de arcillas rojas.

Espesor: variables entre 170 y 700 m. El contacto inferior con la formación Lagunillas se considera como concordante.

### **2.3.2. Formación Isnotú**

Edad: Mioceno medio a superior, a base de correlaciones regionales

Predominantemente arcillas (65%), con numerosas areniscas intercaladas y capas subordinadas de arcilla laminar, carbón y conglomerado.

Espesor: En la faja de afloramientos el espesor es bastante constante de 11.000 metros, disminuyendo al norte y al oeste.

### **2.3.3. Formación Lagunillas**

Edad: parte inferior del Mioceno Medio.

En términos generales, la formación consiste en areniscas poco consolidadas, arcillas, lutitas y algunos lignitos. Las características individuales de los miembros reflejan el cambio de ambiente marino somero, a deltáico y fluvial.

Espesor: aproximadamente 300 m

### **2.3.4. Formación La Rosa**

Edad: Mioceno Temprano.

Miembro Santa Bárbara: está formado por areniscas arcillosas poco consolidadas, grises a marrones, que localmente pueden alcanzar espesores bastante grandes, lutitas gris verdoso interlaminadas con areniscas. En el área de Cabimas, las lutitas forman un intervalo de hasta 28 m entre cuerpos de arenisca. Otros autores menciona capas delgadas de caliza dura en la parte sur del campo costanero de Bolívar.

Arena La Rosa (INFORMAL): Areniscas friables, macizas de grano fino, gris a marrón y lutitas gris verdoso.

Espesor: la formación tiene un espesor variable relacionado con su sedimentación sobre la discordancia eocena. En la localidad tipo, el espesor varía de 180 a 250 m disminuyendo hacia el sur y el norte.

#### **2.3.5. Formación Icotea**

Edad: Oligoceno

Consiste en limolitas y arcilitas duras, macizas blancas a gris claro. La formación es predominantemente lutítica, con capas de arenisca 3 a 4,5 m de espesor, localmente petrolíferas.

Espesor: debido a que la formación Icotea se depositó en las depresiones de la discordancia del Eoceno, sus espesores son sumamente variables a través de la cuenca de Maracaibo. En el área tipo, el espesor varía de 20 a 180 m.

#### **2.3.6. Formación Paují**

Edad: corresponde al intervalo del Eoceno medio.

Esencialmente, la unidad es una espesa secuencia de lutitas, claramente diferenciable de las areniscas de las formaciones Misoainfrayacente, en general, hay una virtual ausencia de arenas.

Espesor: en el subsuelo del lago de Maracaibo, se reconocen espesores erosionados de hasta 820 m.

### **2.3.7. Formación Misoa**

Edad: Eoceno inferior a medio.

Las características de los sedimentos de la formación Misoa, dependen de su posición en la cuenca, hacia el noreste hay más lutitas y areniscas de grano fino, mientras que hacia el sur y sureste, el porcentaje de arena aumenta, además los granos se hacen más gruesos. Se encuentran areniscas, limolitas y lutitas intercaladas en distintas cantidades, en toda la sección y hacia el este, en la sierra, algunas capas de caliza, siendo estas escasas y se presentan en la base de la formación.

Espesor: en el campo Urdaneta norte y en Cabimas, hay 4.600 m.

### **2.3.8. Formación Guasare**

Edad: la fauna y el contenido palinológico, permiten establecer firmemente la edad Paleocena.

Es una unidad relativamente delgada y se compone predominantemente de lutitas gris oscuro.

Espesor: es de unos 120 m aproximadamente, aumentando hacia el noroeste.

### **2.3.9. Formación Mito Juan**

Edad: Maastrichtiense superior

Se caracteriza por arcillas grises, gris verdosas y negras, localmente arenosas, en las cuales el contenido de limo y arena aumenta en sentido ascendente y en cuya parte superior se encuentran a veces capas delgadas de calizas y areniscas. En la parte inferior de la

formación hay algunas arcillas laminares grises que son indistinguibles litológicamente de las arcillas de Colón.

Espesor: de 100 a 300 m, así como también se estima que la formación Mito Juan varía entre 100 y 150 m con un espesor promedio de 200 m, el desarrollo máximo de la formación ocurre en la parte sur de la cuenca.

#### **2.3.10. Formación Colon**

Edad: Cretácico Tardío

Se caracteriza por lutitas que son más arenosas hacia la base y hacia la parte superior, donde la unidad cambia transicionalmente a la formación Mito Juan.

Espesor: en la cuenca de Maracaibo y en la sierra de Perijá, el espesor es de 470 m.

#### **2.3.11. Grupo Cogollo**

De base a tope se caracteriza por calizas densas, fosilíferas, con cantidades subordinadas de lutitas oscuras y pocas arenas calcáreas. En el centro del lago de Maracaibo alcanza 610 m (2.000') de espesor. Su base es transicional con las areniscas de la formación Río Negro mientras que el contacto superior con la formación La Luna, está marcado por un fuerte cambio litológico.

#### **2.3.12. Formación La Luna**

Edad: Cenomaniense a Campaniense.

Consiste típicamente de calizas y lutitas calcáreas. Las capas de caliza varían en espesor de 1 - 2 cm hasta unos 50 cm, con estratificación uniforme y monótona.

Espesor: los espesores en la cuenca de Maracaibo varían entre 100 y 300 metros, con tendencia a aumentar de sur a norte.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **3.1. ONDAS RAYLEIGH (R)**

Es un tipo de ondas superficiales, donde el movimiento de las partículas cerca de la superficie es elíptico y retrógrado, limitado al plano vertical y consistente con la dirección de propagación de la onda. Dichas ondas son el resultado de la interferencia de las ondas P y S (Xia et al., 1999). Su amplitud disminuye exponencialmente con la profundidad. La dispersión de este tipo de ondas puede ser usada para calcular el espesor sedimentario de capas superficiales.

#### **3.2. RUIDO SÍSMICO**

El término ruido sísmico designa componentes no deseados de movimiento del suelo que no encajan en el modelo conceptual de la señal bajo investigaciones sísmicas, sin embargo, en el objetivo de estudio se considera como señales útiles. Donde un corto periodo de ruido sísmico se puede usar para estudios de microzonificación en las zonas urbanas y largo periodo de ruido para tomografía de ondas superficiales. El ruido sísmico puede ser generado por:

- Vibraciones ambientales debidas a fuentes naturales; como el océano, el cual está constituido por a) los microsismos océano primarios más pequeños con períodos de entre 10 y 20 s, por lo general alrededor de  $14 \pm 2$  s y b) microsismos de frecuencia secundaria o doble que se relaciona con el pico principal de ruido alrededor de  $6 \pm 2$ s. Mientras que el ruido en tierra a muy largo plazo (0,2 a 50 MHz) se asocia generalmente a las fluctuaciones de la presión atmosférica. Finalmente, el viento (fricción del viento sobre el terreno áspero; árboles y otra vegetación), aguas de precipitación (cascadas o rápidos en los ríos y arroyos), etc son de banda ancha, que varía de aproximadamente 0.5 Hz hasta aproximadamente 15 a 60 Hz (Young *et al.*, 1996).

- Vibraciones artificiales (microtremores), son vibraciones generadas por eventos artificiales producto de la actividad humana tales como tráfico, maquinaria industrial y explosiones de dinamita, cuya principal ventaja respecto a los microsismos es su estabilidad. Están compuestos principalmente por ondas Rayleigh y S y contrario a los microsismos, son de periodo corto (Jaramillo et al., 2012).
- Las señales secundarias resultantes de la propagación de ondas en un medio no homogéneo (dispersión)
- Efectos de la gravedad (como la atracción newtoniana de la atmósfera, las aceleraciones horizontales debido a la inclinación de la superficie)
- Las señales resultantes de la sensibilidad de los sismómetros a las condiciones ambientales (como temperatura-, presión de aire, el campo magnético, etc).
- Las señales debidas a imperfecciones técnicas o deterioro del sensor (corrosión, corrientes en edad de fugas, semiconductores defectuosos, etc).
- auto-ruido intrínseco del sismógrafo
- Los artefactos de procesamiento de datos.

### **3.3. RANGOS DE FRECUENCIAS ASIGNADOS AL RUIDO SÍSMICO**

Según Gutenberg (1958) y Asten y Henstridge (1984), como se aprecia en la tabla 1.1, al ruido sísmico de frecuencias inferiores a 1Hz se le atribuye origen natural. El pico espectral a  $\sim 0.15-0.2$ Hz, antes mencionado, es el más prominente y se asocia a un efecto causado por las olas oceánicas, que viajan en direcciones opuestas, generando ondas estacionarias que disipan energía en forma de ondas elásticas (García, 2010).

Tabla 3.1. Fuentes de ruido ambiental en función de la frecuencia

	<b>Gutenberg (1958)</b>	<b>Asten y Henstridge (1984)</b>
Olas oceánicas golpeando la costa	0.05 – 0.1 Hz	0.5 – 1.2 Hz
Perturbaciones meteorológicas a grandes escalas	0.1–0.25 Hz	0.16–0.5 Hz
Ciclones sobre océanos	0.3–1 Hz	0.5–3 Hz
Condiciones meteorológicas a escala local	1.4–5 Hz	
Tremor volcánico	2–10 Hz	
Urbano	1–100 Hz	1.4–30 Hz

### 3.4. MÉTODOS DE ONDAS SUPERFICIALES

Se dividen de la siguiente forma:

**3.4.1. Métodos activos:** registran ondas Rayleigh inducidas por una fuente impulsiva o por una fuente oscilatoria con movimiento vertical armónico, siendo útil para explorar profundidades de 10 a 20 m, ya que para caracterizar profundidades mayores se necesitaría una fuente muy grande.

**3.4.2. Métodos pasivos:** registran microtremores usando un arreglo instrumental bidimensional sobre la superficie, o bien un solo instrumento; puede ser solo con la componente vertical o con tres componentes de movimiento. El análisis de estos datos se puede realizar con métodos que permiten obtener características de dispersión de ondas superficiales, o bien características de las capas más superficiales como son: la frecuencia fundamental y la amplificación asociada (Flores-Estrella *et al.*, 2004). Alguno de estos métodos son:

- El método de autocorrelación espacial (SPAC) en sus diferentes variantes.
- El método f-k (frecuencia-número de onda) y sus variantes.
- Método ReMi (“RefractionMicrotremor”, Louie, 2001)
- Originalmente por Nogoshi y Igarashi (1971), el Método Nakamura (1989)

### 3.5. MÉTODO NAKAMURA

Consiste en estimar la relación entre los espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontal (H) y vertical (V) de las vibraciones de ruido ambiental grabadas en una sola estación, donde únicamente se obtiene información de la frecuencia fundamental del depósito y no de la amplificación. En esencia estima la función de transferencia aproximada de las capas superficiales del suelo suponiendo que el ruido de los microtremores está compuesto por varios tipos de onda. El método pretende eliminar el efecto de las ondas Rayleigh. Se considera que los microtremores en la base son similares horizontal y verticalmente; dichos microtremores son amplificados por las capas del suelo blando que yacen sobre el sustrato rocoso. Se considera además que los microtremores horizontales se amplifican debido multiflexiones de las ondas S, en tanto los microtremores verticales lo hacen por multiflexiones de la onda P (Alfaro *et al.*, 1999).

Por otra parte, el efecto de la onda Rayleigh aparece resaltado en el movimiento vertical. De esta forma, la magnitud de su efecto puede ser conocida a partir de la relación entre el movimiento vertical en superficie y el movimiento vertical en el afloramiento rocoso. Normalmente, el efecto de la onda Rayleigh es cercano a cero cuando la relación es aproximadamente la unidad. En la medida que la relación aumenta, el efecto de las ondas Rayleigh puede volverse crítico. La propuesta de Nakamura pretende eliminar este efecto. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$SE(\omega) = \frac{Hs(\omega)}{Hb(\omega)} \text{ (Ecuación 3.1)}$$

Donde  $SE(w)$  representa el espectro de los efectos de sitio,  $Hs(w)$  es el espectro de la onda horizontal en superficie y  $Hb(w)$  es el espectro de la onda horizontal en la base del movimiento. Puesto que las ondas internas de los microtemores contienen ondas superficiales, es necesario corregirlas removiendo los efectos de las ondas superficiales. Nakamura, supone que el efecto de las ondas Rayleigh ( $As$ ), está incluido en el espectro de ondas verticales superficiales ( $Vs$ ) y no en la base del movimiento ( $Vb$ ) y consecuentemente puede ser definido como:

$$As = \frac{Vs}{Vb} \text{(Ecuación 3.2)}$$

Removiendo el efecto de las ondas Rayleigh, el espectro de sitio modificado queda definido por:

$$Sm(w) = \frac{SE(w)}{As(w)} = \frac{\frac{Hs(w)}{Hb(w)}}{\frac{Vs(w)}{Vb(w)}} \text{(Ecuación 3.3)}$$

Posteriormente de manera experimental Nakamura determinó usando registros directos de microtemores que:

$$\frac{Vb(w)}{Hb(w)} \approx 1 \text{(Ecuación 3.4)}$$

Finalmente sustituyendo la ecuación 3.4 en la ecuación 3.3 se obtiene:

$$Sm(w) = \frac{Hs(w)}{Vs(w)} \text{(Ecuación 3.5)}$$

Concluyendo así que el cociente espectral entre la componente horizontal y vertical del movimiento en un mismo sitio puede ser usada como un estimativo de los efectos de sitio para ondas internas. La técnica de Nakamura es muy atractiva, ya que elimina los efectos de fuente, patrón de radiación y trayecto que se presentan en los sismos. Además se ha impuesto debido a su bajo costo y relativa facilidad de realización (Jaramillo *et al.*, 2012).

Al contrario que los terremotos, el ruido ambiental tiene la ventaja de generarse de forma continua, y comparado con una fuente artificial de pequeña intensidad, tiene habitualmente un rango espectral más amplio. Sin embargo su utilización también presenta aspectos problemáticos, como la incertidumbre en la ubicación y características de las fuentes, lo que puede hacer necesarios sistemas de adquisición de datos y de análisis más complejos.

### **3.6. ESTIMACIÓN DE ESPEORES SEDIMENTARIOS**

La fórmula definida por Kramer (1996), permite calcular el espesor sedimentario a partir de la frecuencia de resonancia de la siguiente manera:

$$T_o = \frac{4H}{V_s} \text{(Ecuación 3.6)}$$

Donde H es el espesor sedimentario,  $T_o$  el período fundamental y  $V_s$  la velocidad de onda de corte. Pudiendo estimar así las profundidades a partir del período de resonancia del sitio.

### **3.7. ELIPTICIDAD DE LA ONDA RAYLEIGH**

Definimos la elipticidad de la onda Rayleigh como el cociente entre las amplitudes del movimiento horizontal y vertical de la partícula (semiejes de la elipse). La forma de las curvas de elipticidad es fuertemente dependiente de la estructura del suelo. En el caso de un semiespacio homogéneo, la elipticidad depende exclusivamente del coeficiente de Poisson (Garcia, 2010).

El cociente espectral H/V está básicamente relacionado con la elipticidad de las ondas Rayleigh, debido a la predominancia de este tipo de ondas en la componente vertical. (Jaramillo *et al.*, 2012). Sin embargo, aunque exista un predominio de las ondas de Rayleigh en el campo de ondas, la relaciones H / V no pueden ser tomado directamente como elipticidad de Rayleigh, si no se aplica alguna corrección, ya que por lo general la

relación  $H / V$  proporciona una sobreestimación de la elipticidad real de las ondas de Rayleigh (Poggiet *al.*, 2012).

Existen varias técnicas que permiten hacer esta corrección, entre ellas se encuentra el método RayDec, el cual estima a partir de la onda Rayleigh el espectro de elipticidad utilizando la técnica de decremento aleatorio (Asmussen, 1997), mediante el decremento al azar de tres componentes de registros de ruido sísmico haciendo uso de la componente vertical como desencadenante principal y un apilamiento de un gran número de señales horizontales y verticales, para así hacer énfasis en las ondas Rayleigh con respecto a las ondas de cuerpo y Love (Hobigeret *al.*, 2009)

### **3.8. INVERSIÓN**

El objetivo del proceso de inversión es generar un modelo de estratos horizontales de suelo con propiedades elásticas compatibles con las observaciones de terreno y reflejadas a través de la curvas de dispersión o autocorrelación. De acuerdo a lo planteado por diversos autores, estas curvas dependen principalmente de la velocidad de ondas de corte, y son prácticamente insensibles a variaciones de la densidad y velocidades de ondas de compresión con la profundidad. La inversión no es un proceso trivial, ya que existen muchos modelos de suelo que se ajustan a las observaciones de terreno observado. (Sambridge, 2001).

La idea general de la inversión (figura 3.1), es calcular las curvas de dispersión o autocorrelación asociadas a modelos de estratos horizontales de suelo (problema directo), y utilizando algún algoritmo de búsqueda, encontrar el modelo que tenga el mayor ajuste con las observaciones de terreno (problema inverso) (Humire, 2013).

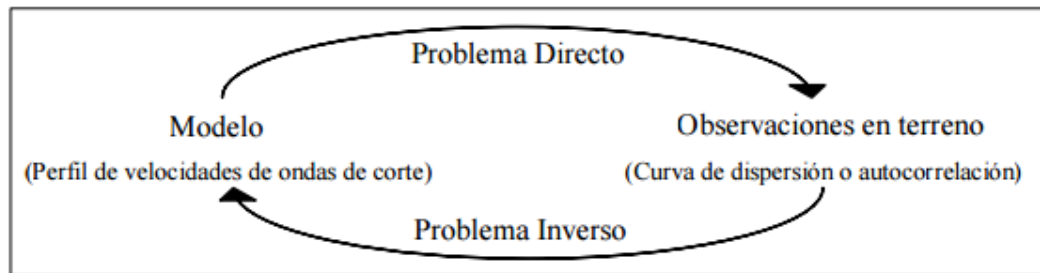


Figura 3.1. Esquema del problema inverso (Humire, 2013)

### 3.9. ALGORITMO DEL VECINDARIO (NEIGHBORHOOD ALGORITHM).

Sambridge (2001) plantea un método basado en la división del espacio de los parámetros en celdas de Voronoi (para un conjunto finito de modelos se encierra los puntos del espacio que estén más cercanos). Sus principales ventajas respecto a otras estrategias de inversión son que no requiere de un modelo inicial y explora muy bien el espacio factible de combinaciones de parámetros. En la primera etapa del algoritmo, se generan modelos iniciales en forma aleatoria que exploran homogéneamente el espacio de los parámetros y lo subdividen en celdas de Voronoi. Para cada modelo generado, se evalúa su desajuste con las observaciones de terreno, con el objeto de seleccionar la celda que contenga el mejor ajuste. Al interior de ella, se generan nuevos modelos aleatorios, para volver a evaluar el desajuste y repetir la subdivisión del espacio en celdas. Este proceso se puede repetir hasta alcanzar un modelo que tenga curvas de dispersión o autocorrelación teóricas tan cercanas, dentro de lo posible, a las obtenidas en terreno (desajuste mínimo). En términos prácticos, se limita el número de iteraciones, o nuevas subdivisiones del espacio (Humire, 2013).

### 3.10 RELACIÓN DE POISSON ( $\sigma$ )

Cuando un cuerpo se alarga por efecto de tracción, este se acorta al mismo tiempo en la dirección perpendicular a la tracción y análogamente, cuando se acorta por efecto de una presión, se alarga en ángulo perpendicular a la dirección de acortamiento. La relación

entre la deformación transversal y la deformación longitudinal es denominada la relación de Poisson, donde  $\sigma$  nunca es mayor de 0,5.

Este módulo está definido por la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{0,5 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{1 + \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2} \text{ (Ecuación 3.7)}$$

## CAPÍTULO IV

### MARCO METODOLÓGICO

El desarrollo metodológico de la investigación se muestra a continuación en la figura 4.1:

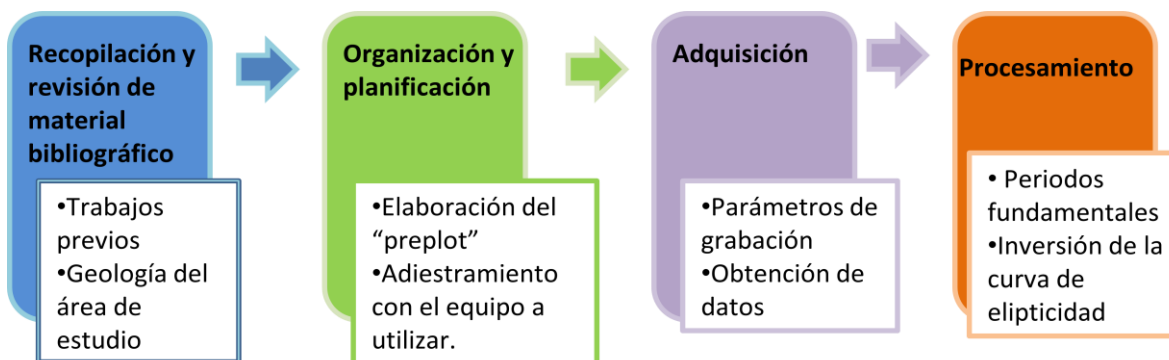


Figura 4.1. Esquema de metodología de investigación

#### 4.1. REVISIÓN Y RECOPIACIÓN DE MATERIAL BIBLIOGRÁFICO.

Recopilación de información y trabajos sobre el método Nakamura, ruido ambiental e inversión de la curva de elipticidad, así como, también información geológica de la zona de estudio.

#### 4.2. ORGANIZACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE CAMPO

Mediante el uso del programa *ArcGis 9* se realiza un *preplot* de la zona a estudiar, entre la población de Bachaquero y Cabimas, estableciendo una poligonal con una distancia entre estaciones de 5 a 7 km para todas las vías del área.

#### 4.3. ETAPA DE ADQUISICIÓN

La adquisición consistió en un trabajo de campo realizado en el mes de enero de 2016 con una duración de 8 días. Donde se registró un total de 33 estaciones, siguiendo las recomendaciones del proyecto SESAME (2004)

#### 4.3.1. Equipos de adquisición

- Digitalizador REF TEK modelo 130-B

Es un registrador sísmico portátil (figura 4.2) de banda ancha con un rango dinámico mayor a 138 dB. Cuenta con dos unidades extraíbles de 16 GB cada una, para un total de 32 GB de almacenamiento. Posee cinco conectores: conexión a la batería de 12V, conexión a la red, conexión al sismómetro, conexión al dispositivo de control, conexión al receptor GPS, dos ranuras (para tarjetas de memoria extraíble) y una pantalla LED.



Figura 4.2. Digitalizador modelo 130-B (REF TEK, 2011)

- Sismómetro REF TEK modelo 151B

Es un sensor de retroalimentación con ancho de banda de frecuencia de 0,033 Hz (30 segundos) - 50 Hz. Contiene tres sensores independientes (uno vertical y dos horizontales) con una función de circuito de retroalimentación electrónica, circuitos de control y conversión de energía, bajo ruido y amplio rango dinámico (figura 4.3).



Figura 4.3. Sismómetro REF TEK modelo 151B (REF TEK, 2011)

- GPS navegador de mano marca GARMIN

- Libreta de campo

- IPod Touch de 32GB

- Brújula

- Vehículo

- Batería 12V.

#### **4.3.2. Parámetros de adquisición**

Tiempo de grabación: 40 minutos

Frecuencia de muestreo: 200 Hz

Espaciamiento entre estaciones: 5 km aproximadamente.

#### **4.3.3. Consideraciones de adquisición**

Para la adquisición en campo se tomaron en cuenta las consideraciones planteadas en el Proyecto SESAME (2004):

- Para garantizar un buen acople suelo-sensor el mismo debe colocarse directamente sobre el suelo, excepto en situaciones muy especiales.
- Evitar colocar el sensor sobre suelos blandos, tales como barro, tierra arada o algún material sintético como goma espuma o cartón, ya que la curva H/V resulta alterada.
- Evitar colocar el sensor cerca de estructuras como edificios o árboles, ya que existe clara evidencia que los movimientos de las estructuras debido al viento pueden introducir fuertes perturbaciones de baja frecuencia en el suelo.
- Evitar realizar mediciones cuando hay fuertes lluvias, si la lluvia es débil, no tiene influencia en el registro.

- Evitar realizar mediciones cercano a máquinas de construcción o industriales, ya que introduce una vibración constante que no puede ser filtrada.
- En caso de transitorios (paso de vehículos, peatones) se recomienda aumentar la duración de la grabación, de modo que al filtrar el ruido aleatorio, quede suficiente registro para la selección de las ventanas.
- Los tiempos de grabación recomendados de acuerdo al mínimo de frecuencias esperados se observa en la tabla 4.1

Tabla 4.1. Tiempo de grabación de acuerdo a la frecuencia esperada (SESAME, 2004)

<b>Mínima frecuencia esperada (Hz)</b>	<b>Tiempo de grabación (min)</b>
0,2	30
0,5	20
1	10
2	5
5	3
10	2

Haciendo uso de las consideraciones antes mencionadas se procede a realizar las mediciones en las estaciones ya preestablecidas en el *preplot*, de la siguiente manera:

1. Mediante el GPS se ubica la estación a medir en el área de estudio.
2. Se coloca el sensor a una distancia aproximada de 5 m del digitalizador, para evitar ruido electrónico, para luego, orientar el logo del sensor con el norte geográfico, esto para tener certeza de que los sensores horizontales se encuentren en dirección norte-sur y este-oeste.
3. Se usa la llave tipo T para hacer girar los tornillos de nivelación ajustables, hasta que los niveles de burbujas integrados a los laterales del mismo se ubiquen correctamente, como se muestra en la figura 4.4. Cuando esto suceda el sismómetro estará calibrado

correctamente y se puede proceder a la liberación de las masas. Es importante tener en cuenta, que una vez liberadas las masas no se debe mover el instrumento. Seguidamente se conecta el cable a la respectiva entrada del sensor en el digitalizador (entrada CHAN 1-3).



Figura 4.4. Nivelación del sensor.

4. Se coloca el GPS en un área estable y alta, conectando el cable a la entrada GPS del digitalizador.

5. Se conecta el dispositivo de control en el digitalizador en la entrada SERIAL, verificando que contenga la aplicación RT. Luego, se procede a conectar el cable de la batería de 12 V para suministrar corriente.

6. Se verifica que los tres canales estén funcionando correctamente (figura 4.5), en caso de que no sea así, debe esperarse unos minutos que el sensor se estabilice y se verifica nuevamente. Cuando se confirme que los tres canales estén registrando correctamente, se da inicio a la grabación.



Figura 4.5. Control de la señal

7. Se anota en la libreta de campo la hora de inicio de grabación, día, nombre del archivo, número de estación, latitud, longitud y cualquier observación que pueda generar variaciones en la medición. Durante el proceso de grabación se debe evitar transitar muy cerca de los equipos, con el fin de garantizar el menor ruido local en los datos.

8. Finalizado los 40 minutos de grabación, se pulsara la opción OFF, seguidamente se desconecta la corriente, luego se bloquearan las masas del sensor, y se continúa con el desmontaje del equipo, para seguir a la próxima estación.

#### **4.4. METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO**

Para el procesamiento de los datos se debe comenzar con la transformación del formato de origen a formato .SAF ya que este tipo de archivo no es compatible con *Geopsy*, por lo que se hace uso de los siguientes pasos que se describen a continuación en el tutorial realizado por Rocabado (2012) llamado “Uso del Equipo REFTEK-130 para estudios de ruido ambiental”.

1. Al finalizar las jornadas de adquisición se retira la memoria del digitalizador REFTEK y se descargan los datos al ordenador mediante un adaptador. Se guarda esta información en la carpeta archive ubicada en C:\reftek como se muestra a continuación en la figura 4.6:

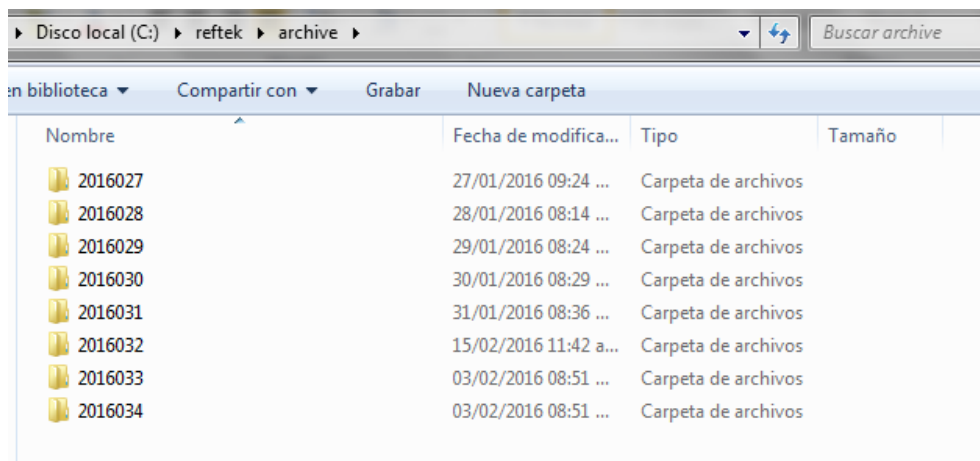


Figura 4.6. Carpetas de los datos descargados de la memoria.

2. Mediante el programa RT\_View se realiza la verificación del registro obtenido en cada estación. Donde se puede apreciar los registros de los tres componentes (figura 4.7).

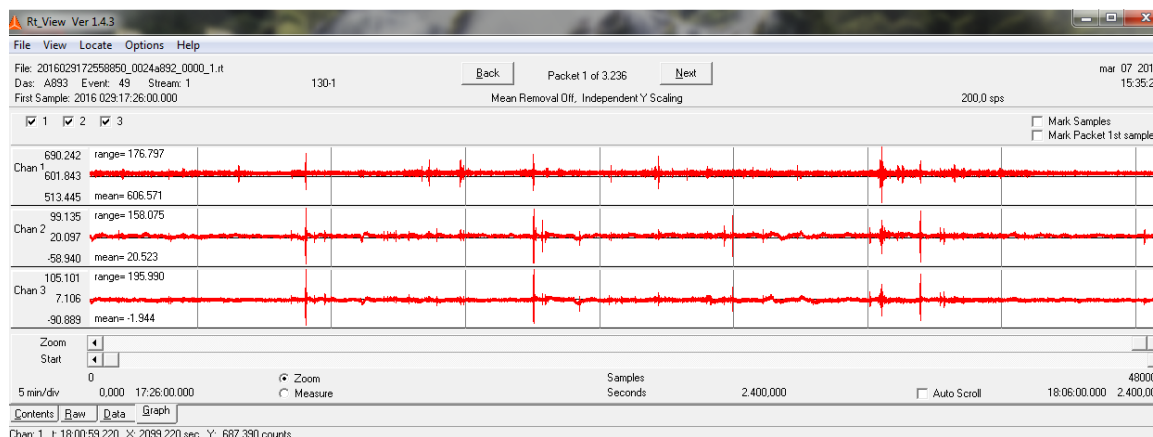


Figura 4.7. Visualización de la señal con programa RT\_View.

3. Luego se genera un archivo .BAT como se muestra en la figura 4.8, modificando la fecha y las horas del comienzo de grabación de cada una de las estaciones del día, para posteriormente ejecutar el comando *arcfetch*.

```

RCOLM29: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
arcfetch c:\reftek\archive *,1,*,16:029:12:06:00.000,+2400.000
arcfetch c:\reftek\archive *,1,*,16:029:13:06:00.000,+2400.000
arcfetch c:\reftek\archive *,1,*,16:029:14:04:00.000,+2400.000
arcfetch c:\reftek\archive *,1,*,16:029:15:11:00.000,+2400.000
arcfetch c:\reftek\archive *,1,*,16:029:16:15:00.000,+2400.000
arcfetch c:\reftek\archive *,1,*,16:029:17:26:00.000,+2400.000
arcfetch c:\reftek\archive *,1,*,16:029:18:31:00.000,+2400.000
arcfetch c:\reftek\archive *,1,*,16:029:19:37:00.000,+2400.000
arcfetch c:\reftek\archive *,1,*,16:029:20:39:00.000,+2400.000

```

Figura 4.8. Archivo .BAT

4. Se genera una carpeta de cada una de las estaciones que contenga la información de los tres componentes que se generan guardando el registro en RT\_View y el archivo que se obtiene luego de ejecutar el paso anterior como se muestra en la figura 4.9

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
2016029172558850_0024a892_0000_1.rt	29/01/2016 08:35 ...	Archivo RT	3.236 KB
E49S0C0	29/01/2016 08:43 ...	Archivo DAT	3.751 KB
E49S0C1	29/01/2016 08:43 ...	Archivo DAT	3.280 KB
E49S0C2	29/01/2016 08:43 ...	Archivo DAT	3.061 KB

Figura 4.9. Carpeta de la estación RCOLM20

5. Mediante la rutina *Refteck-to-SAF* (Rocabado, 2012) observada en la figura 4.10, se obtiene finalmente el archivo .SAF, colocando el tiempo de cada registro y la frecuencia de muestreo. Realizando este paso con cada una de las estaciones realizadas.

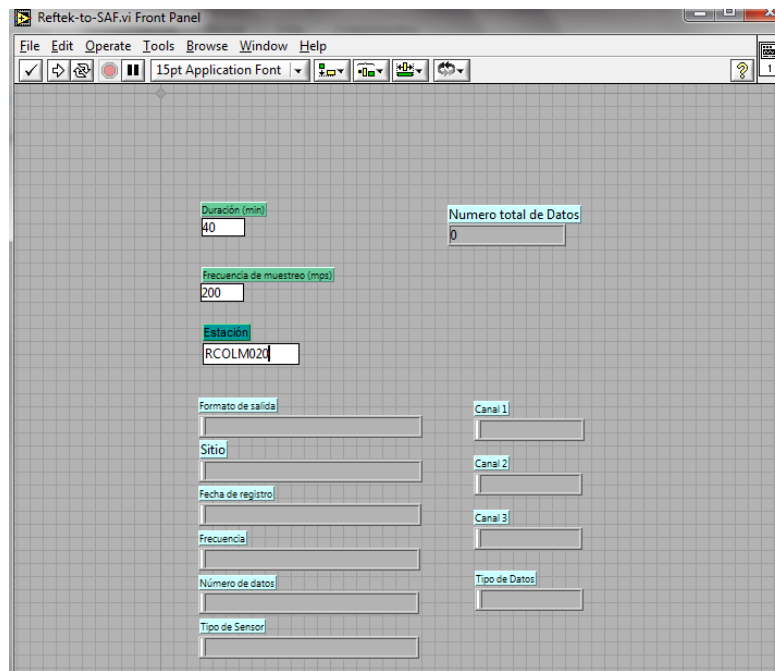


Figura 4.10. Rutina Reftek-to-SAF (Rocabado, 2012).

#### 4.4.1. Obtención de la relación espectral H/V

Haciendo uso del programa *Geopsy*, se abre el archivo correspondiente a la estación a procesar, ingresando en el ícono *import signals*, como se muestra en la figura 4.11

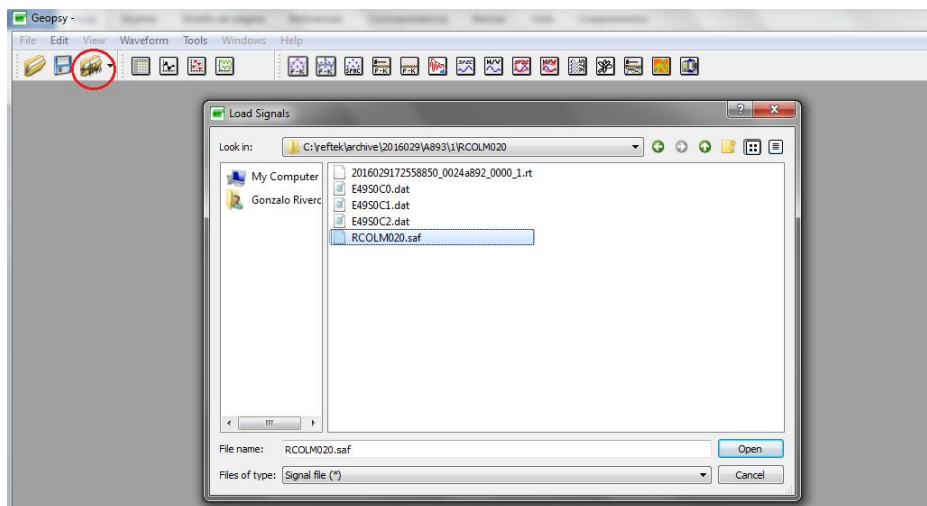


Figura 4.11. Ventana para abrir el archivo .SAF

Al observarse los tres componentes de la señal se procede a eliminar el valor de desplazamiento de la señal, a través del menú *waveform>subtract value*(figura 4.12),por

lo que aparecerá un cuadro de diálogo donde se debe seleccionar el tipo de sustracción que se desea realizar, si el promedio o un valor específico, en este caso se seleccionó la opción *mean value*, el cual remueve la media aritmética de la amplitud de la señal para todo el tiempo de registro, quedando la señal sin desplazamiento vertical.

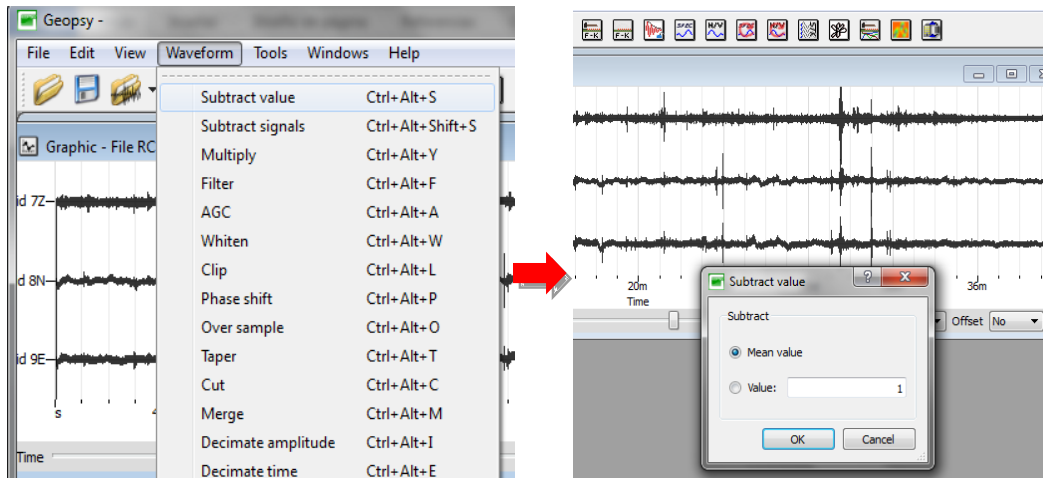


Figura 4.12. Ventana de *mean value*.

Posteriormente, se procede a aplicar los filtros con el fin de depurar la señal y obtener una señal filtrada en la frecuencia de interés, para ello se ingresa en el menú *waveform>filter*, donde aparecerá una ventana de diálogo (figura 4.13), en la cual se debe introducir el tipo de filtro que se desea aplicar, así como la frecuencia de corte para dicho filtro, la cual dependerá del objetivo de estudio y de las profundidades que se desean estimar. En este caso se aplicó un filtro Butterworth pasa banda con frecuencias de paso entre 0,05 y 15 Hz. El orden del filtro define la pendiente de rechazo, de modo que mientras mayor sea el orden del filtro, mayor será dicha pendiente; por ello se usó un filtro Butterworth de orden 2.

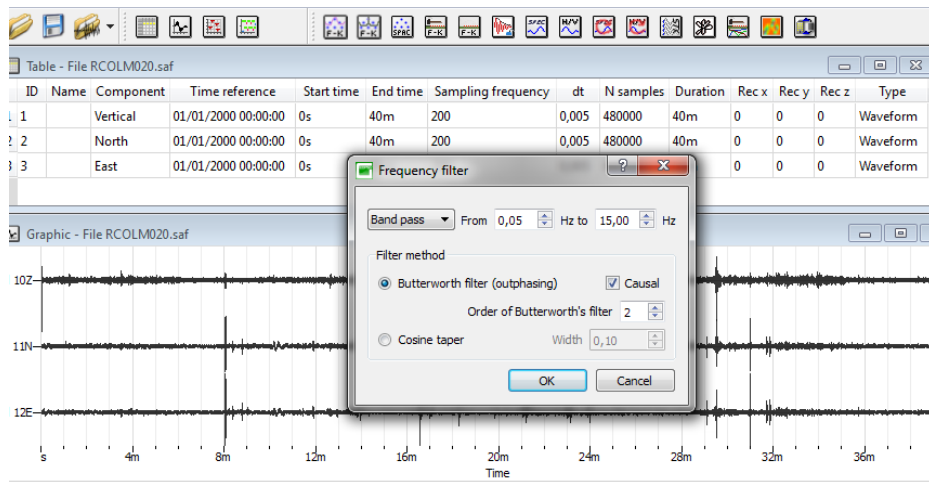


Figura 4.13. Filtro Butterworth pasa banda entre 0,05 y 15 Hz.

Además se aplica el control automático de ganancia (AGC), que consiste en calcular para cada ventana el promedio RMS de todas las amplitudes presentes en dicho intervalo, para luego dividir la amplitud del punto actual por dicho valor. En este caso, la longitud de la ventana usada fue de 3 segundos.

A continuación en el menú de herramientas, se tilda el icono H/V, seguidamente aparecerá una pestaña para la selección de ventanas (figura 4.14). En esta ventana se procederá a caracterizar los parámetros para cada estación, estos variaran para cada estación, dependiendo de factores como ubicación de la adquisición o visualización de la señal. En dicha ventana, se observan 3 pestañas principales: *time*, *processing* y *output*.

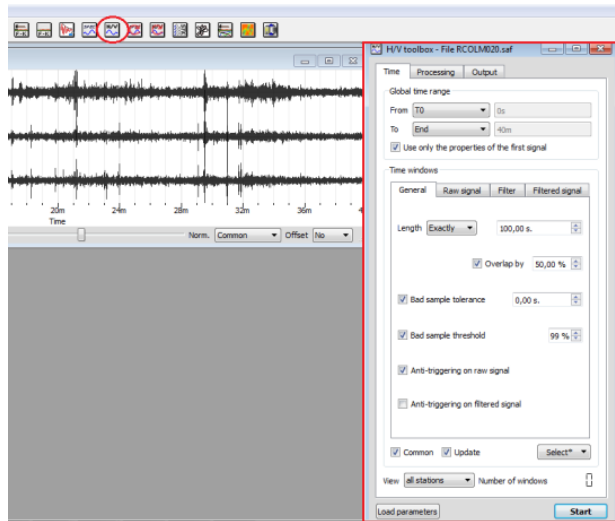


Figura 4.14. H/V toolbox

Los parametros usados son de 300 segundos de longitud de la ventana, se seleccionó un overlap de 50%, esto permite que ventanas sucesivas o contiguas se solapen, generando superposición. Además, se tildan las casillas de *Bad sample tolerance* y *Anti-triggering on filtered signal*, correspondientes al número máximo de muestras erradas que pueden ser aceptadas y la segunda conserva las partes más fijas de las vibraciones ambientales.

Los valores de las sub ventana *Raw Signal* tienen un valor predeterminado como se muestra en la figura 4.15, los cuales deben ser ajustados acorde al contenido de ruido de la señal.

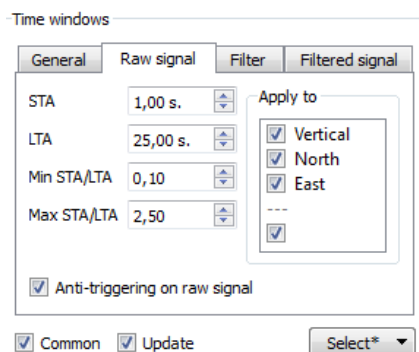


Figura 4.15. Ventana *Time* en *Geopsy*

Se hizo uso del tipo de suavizado *Konno Ohmachi* de 20 a 40, según la señal, ya que proporciona un buen suavizado sin picos pronunciados en las curvas. Finalmente el valor de *Frequency sampling* fija los parámetros sobre los límites de frecuencia, para este caso se consideran desde 0,05 hasta 15 Hz.

#### 4.4.2. Estimación de Vs

Para realizar el cálculo de las profundidades de la base de las capas sedimentarias es importante conocer el período fundamental, así como también la velocidad de onda S correspondiente a cada estación. Para estimar dichas velocidades se hace uso de las relaciones empíricas establecidas por Brocher (2005) a partir de la compilación de varios tipos de roca, y la relación de Vs en función de Vp se definen a través de la siguiente ecuación (ecuación 4.1) denominada “ajuste de regresión de Brocher”:

$$V_s \left( \frac{km}{s} \right) = 0.7858 - 1.2344V_p + 0.7949V_p^2 - 0.1238V_p^3 + 0.0064V_p^4 \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

A partir de la información del registro sísmico de cuatro pozos realizados por PDVSA Occidente (figura 4.16), se obtuvo las velocidades Vp, tanto para la estimación de Vs mediante la ecuación 4.1, como para realizar la inversión de la curva de elipticidad.

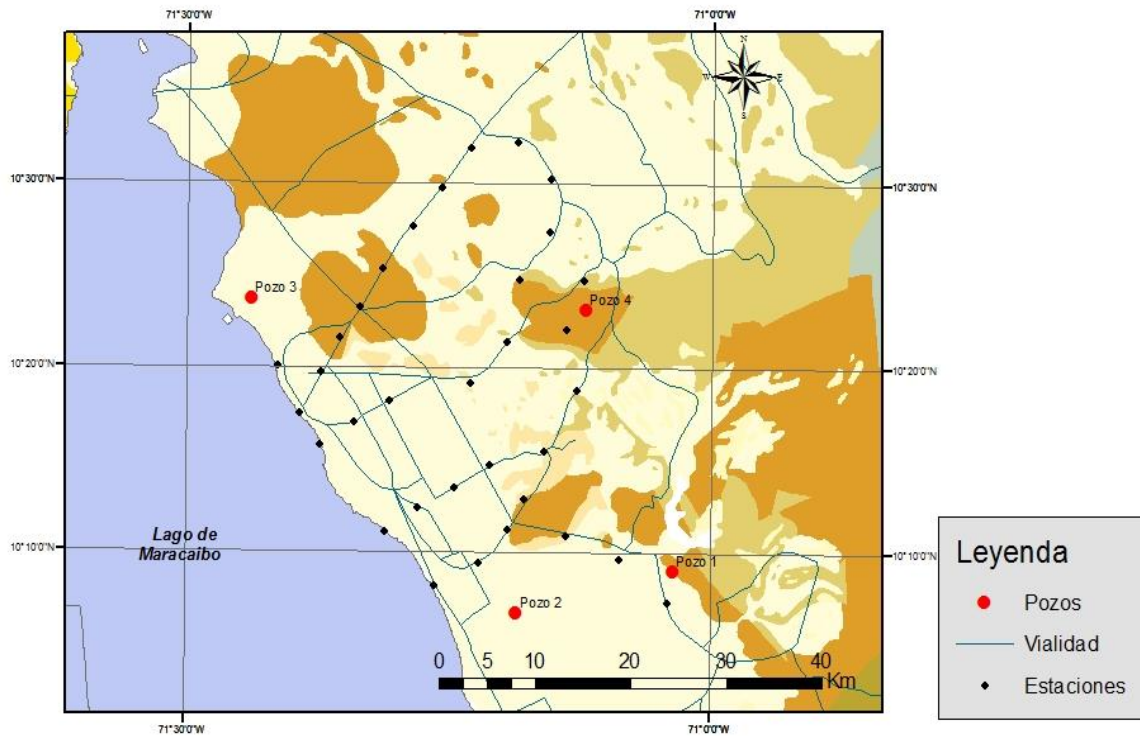


Figura 4.16. Mapa de ubicación de los pozos (suministrado por PDVSA)

#### 4.4.3. Calculo de la elipticidad de la curva

Se hizo el uso del método RayDec, que consiste en el decremento aleatorio (Asmussen, 1997), para hacer énfasis en las ondas Rayleigh con respecto a las ondas de cuerpo y Love. Para ello se utilizó una rutina suministrada (Hobiger *et al.*, 2009), que a partir de los archivos .hv previamente filtrados mediante Geopsy, genera una imagen de la curva de elipticidad y un nuevo archivo .hv que posteriormente será usado en la herramienta *Dinverde Geopsy* para la inversión.

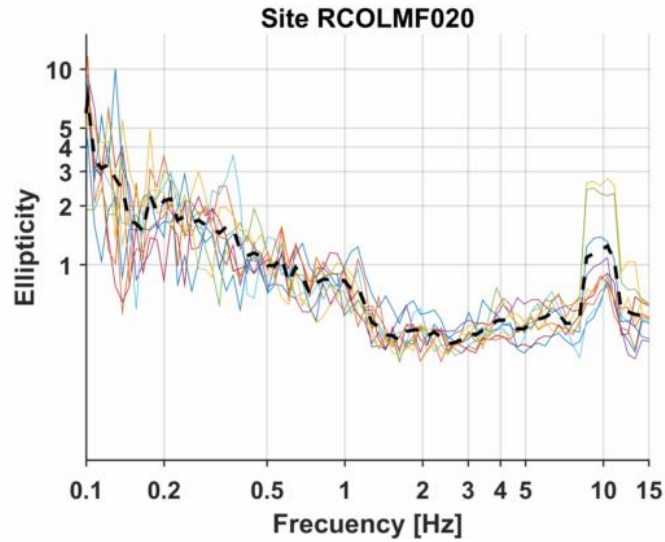


Figura 4.17. Curva de elipticidad de la estación RCOLMF020

#### 4.4.4. Inversión de la curva

La inversión se realiza a partir de los datos obtenidos del procesamiento anterior, haciendo uso del programa *GEOPSY Dinver*, donde se puede generar un perfil estratigráfico del subsuelo donde se tomaron las grabaciones de ruido ambiental. Los datos son cargados desde Dinver, a través de la pestaña *Targets > Ellipticity curve > set > load* como se muestra en la figura 4.17.

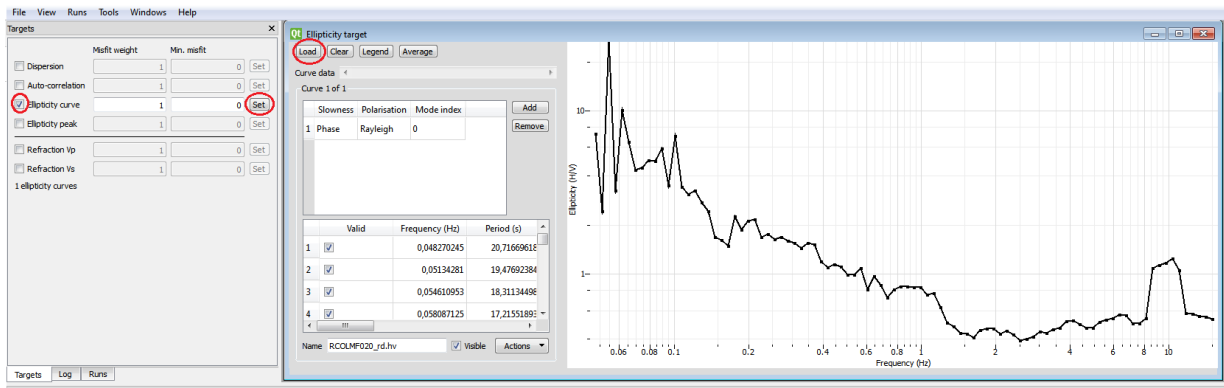


Figura 4.18. Carga de datos en *Dinver*

Al tener los datos cargados, se procede a ingresar manualmente la estratigrafía desde la pestaña *Parameters*, agregando el número deseado de estratos, incluyendo Vp, Vs, relación de Poisson y densidad.

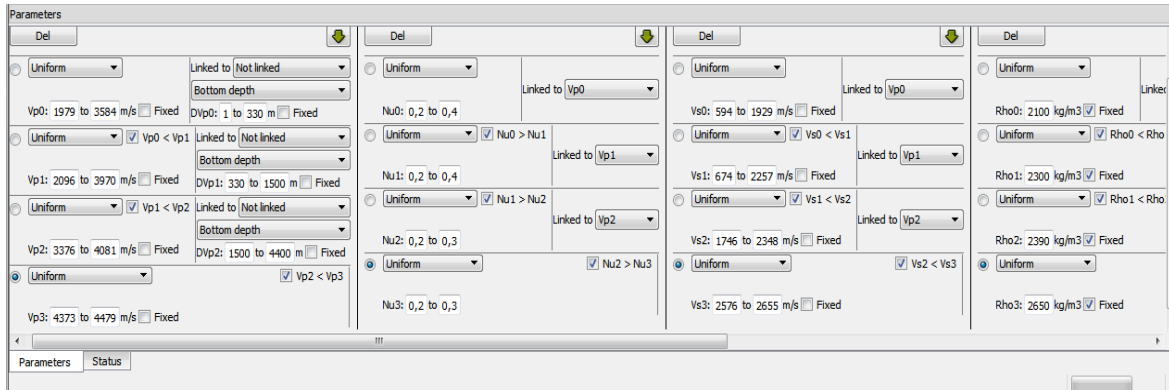


Figura 4.19. Ingreso de parámetros

Para iniciar el proceso, se ingresa en el menú *Runs>Add*, donde posteriormente mediante la pestaña *Runs* se va observando el ingreso de nuevas corridas.

Se selecciona la corrida a ejecutar y de nuevo en el menú *Runs>Start* se iniciará el proceso. Se realiza la cantidad de corridas necesarias con la finalidad de disminuir el error producido (*Min misfit*) modificando los valores según la información que se tenga de la zona en estudio. Realizado este proceso, se puede observar la curva de elipticidad seleccionando *View >Ellipticity*, así como también los modelos generados en *View >GroundProfile*.

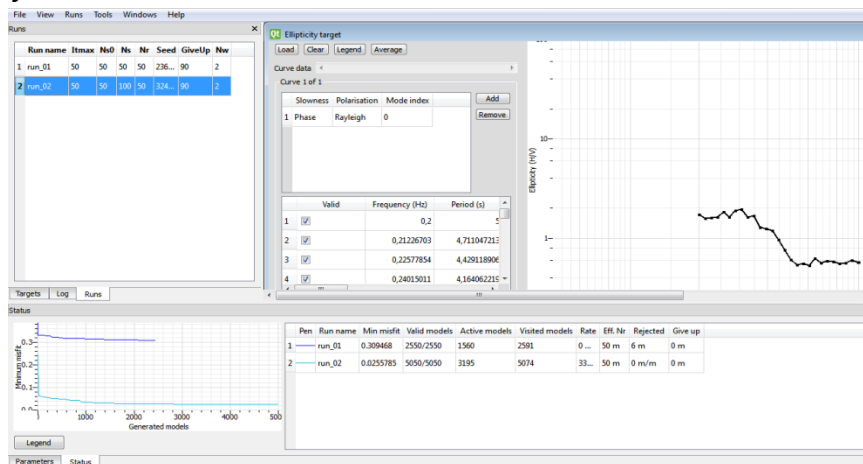


Figura 4.20. Generación de modelos de prueba.

**CAPÍTULO V**  
**RESULTADOS Y ANÁLISIS**

**5.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Posterior al procesamiento de los datos obtenidos se realizó un análisis estadístico con la finalidad de verificar, cuantificar y analizar la distribución de los datos mediante el programa *Microsoft Excel 2010*. A través del mismo, se logró determinar el comportamiento de la distribución de datos (tabla 5.1), donde se observa un valor máximo de 20 s y un mínimo de 0,18 s; con una media de 7,71 s mediana 6,79 s y moda 0,53 s, lo que indica que la distribución es asimétrica ya que los valores de la tendencia central (media y mediana) no son iguales.

Se obtuvo una curtosis negativa de -1,29 lo que caracteriza la elevación o el achatamiento relativo de una distribución, comparada con la distribución normal, por lo tanto, en este caso, hay una reducida concentración alrededor de los valores centrales de la distribución.

Tabla 5.1. Datos de la estadística descriptiva

<i>Estadística Descriptiva (s)</i>	
Media	7,72
Error típico	0,48
Mediana	6,79
Moda	0,53
Desviación estándar	6,12
Varianza de la muestra	37,44
Curtosis	-1,29
Coefficiente de asimetría	0,34
Rango	19,82
Mínimo	0,18
Máximo	20
Suma	1273,76
Cuenta	165

En el histograma de frecuencias (figura 5.1) se observa una distribución multimodal, con comportamiento asimétrico, con 5 subpoblaciones, donde se encuentra una mayor concentración entre 0,18 a 1,83s, el segundo de 1,83 a 3,48 s, seguido del rango entre 6,79 a 8,44 s, luego una cuarta subpoblación de 11,74 a 13,39 s y finalmente una oscilando entre 16,7 a 18,35 s una quinta subpoblación. Dicho comportamiento se atribuye a la litología presente en la zona, que a pesar de su irregularidad presenta un indicador de cinco contrastes de litologías distintas.

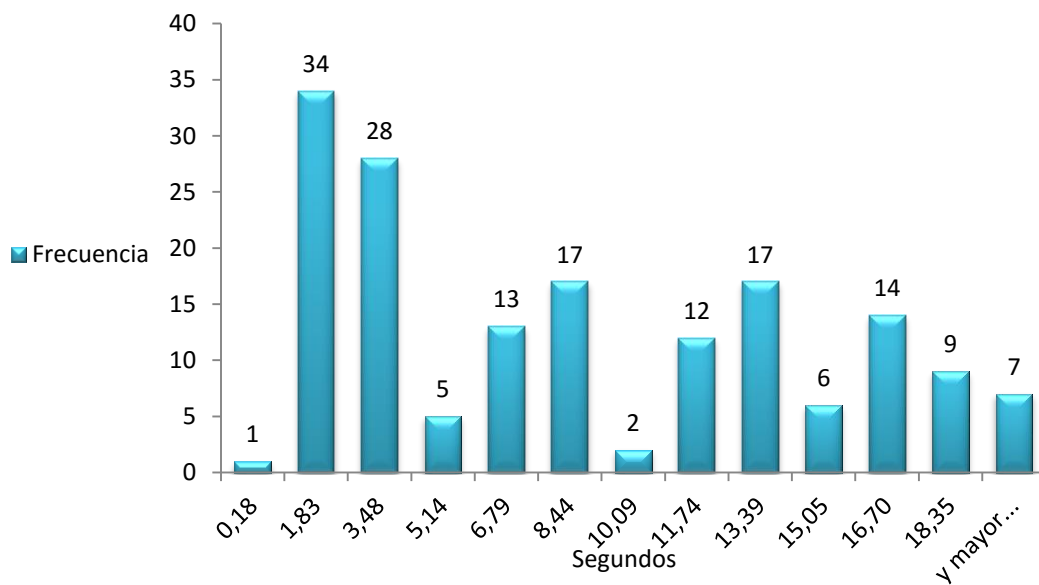


Figura 5.1. Histograma de frecuencia de los periodos

## 5.2. COCIENTES ESPECTRALES H/V

Culminadas las fases de adquisición y procesamiento de los datos adquiridos, a través de la aplicación del método de Nakamura para la estimación del periodo fundamental del suelo, se obtuvieron los resultados que proporcionan información sobre el contraste de impedancia en profundidad, determinando los picos predominantes en cada una de las estaciones, para luego encontrar la similitud entre los valores obtenidos de cada estación y realizar una correlación con la geología de la zona.

En la figura 5.2 se observa la gráfica H/V de la estación RCOLM010, de manera muy definida se aprecian 5 picos predominantes en 0,67; 2,54; 6,39; 11,84 y 16,81 s, donde el primero atribuye al límite entre Post-Eoceno y el Eoceno; el segundo correspondiente al Eoceno entre las formaciones Paují y Misoa; el tercer pico en esta estación y en la mayoría de las estaciones se caracterizan por ser de gran amplitud, por lo que se asocia a zonas de transición entre la formación Guasare y Mito Juan; el cuarto y el quinto pico son importantes mencionarlos ya que se observaron en todas las estaciones, sin embargo, no resulta ser información de gran confiabilidad ya que presenta dispersión en los periodos más altos, generando incertidumbre debido al tipo de sensor y el tiempo de grabación.

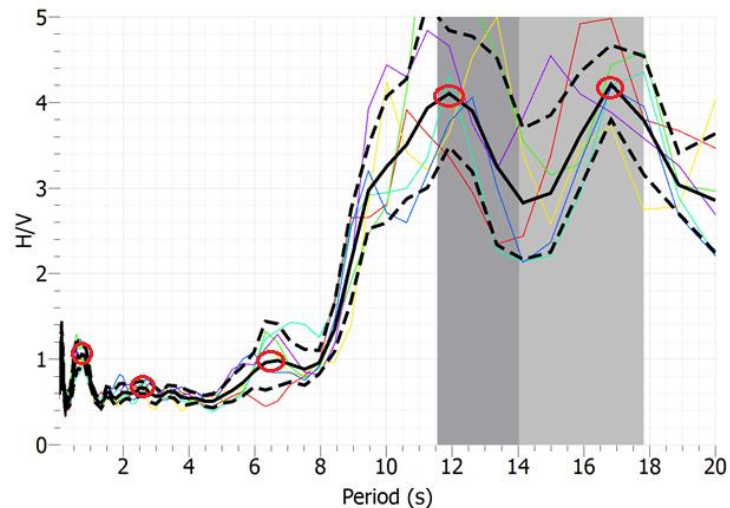


Figura 5.2. Picos definidos correspondientes a la estación RCOLM010.

Es importante destacar que no todas las estaciones presentaban picos tan representativos como en la figura 5.2, ya que muchas presentaban picos múltiples asociados a litologías variadas que corresponden a diferentes tipos de respuestas como en el caso de la estación RCOLM046 (figura 5.3), lo que dificultó establecer el pico representativo, sin embargo, se toma en cuenta el pico con mayor amplitud.

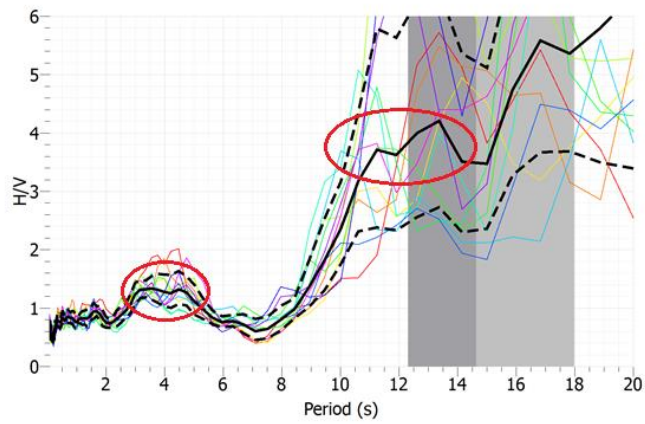


Figura 5.3. Picos múltiples correspondientes a la estación RCOLM046.

A continuación, se muestra, en la figura 5.4, el mapa de la distribución de los perfiles en el área de estudio, donde 4 de ellos pretenden tener una dirección perpendicular a la cordillera y dos de ellos (5 y 6) paralelas.

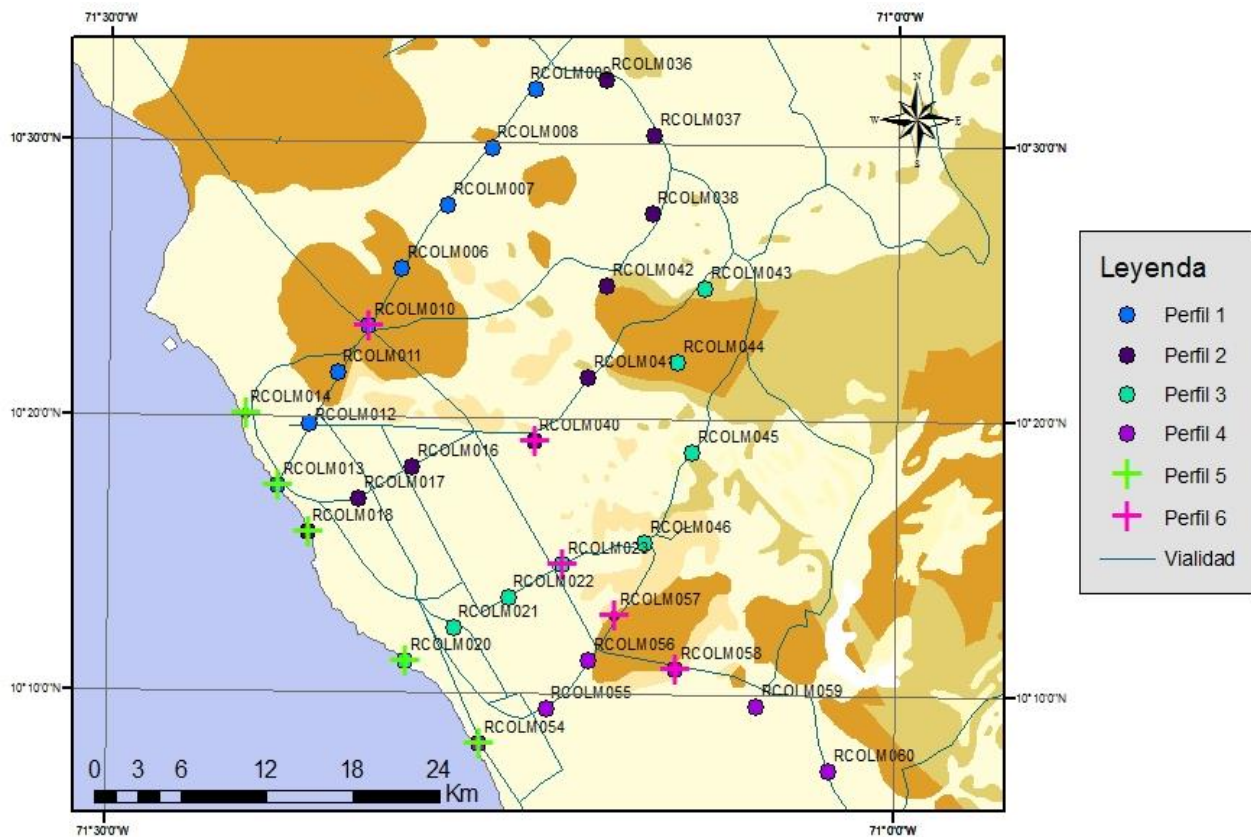


Figura 5.4. Mapa de ubicación de los perfiles

**Perfil 1:** como se puede observar en la figura 5.5, está integrado por 8 estaciones, con una dirección perpendicular a la cordillera, abarcando unos 35 km aproximadamente; donde las estaciones 11, 10 y 06 se encuentran en una zona de exposición del Eoceno y se observa claramente en la figura 5.6 la deformación que existe a lo largo del perfil. Los tres primeros picos de cada estación son los de interés para la investigación, sin embargo, es importante resaltar que entre los periodos 11 al 13 s y entre 14 y 18 s también se encontraron picos representativos.

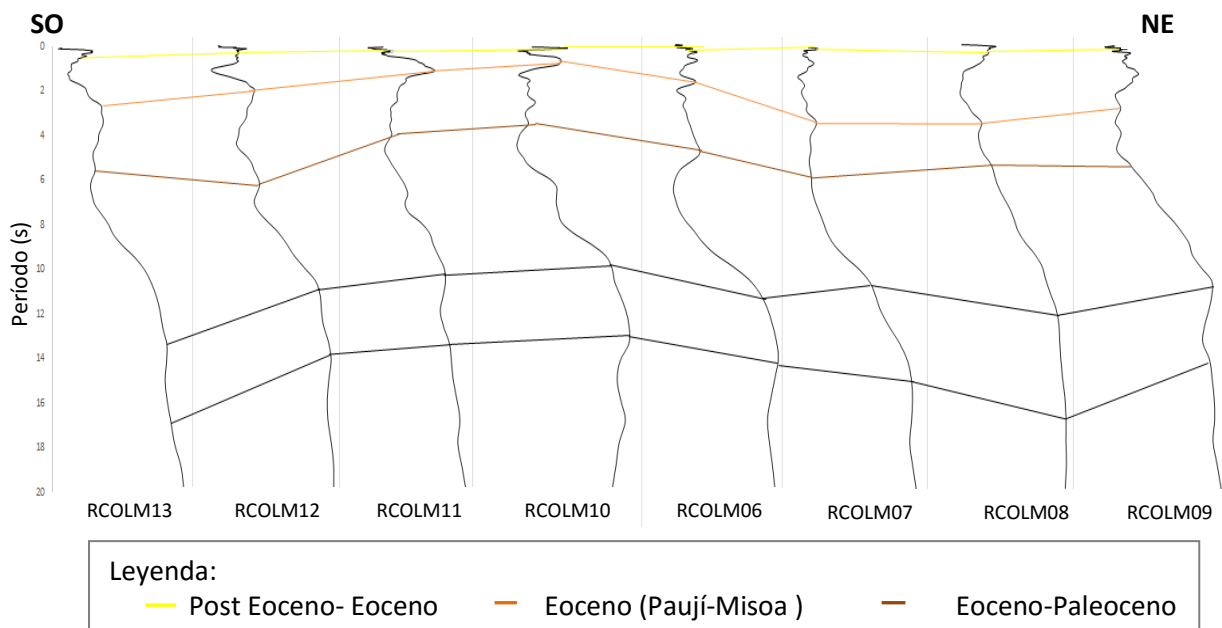


Figura 5.5. Relación entre las amplitudes H/V y la geometría de la cuenca del perfil 1.

**Perfil 2:** Consta de 9 estaciones (figura 5.6), con una extensión de 40 km aproximadamente; se puede notar que en la zona donde se encuentra RCOLM40 existe una notable deformación, donde Requena y Zambrano (2008) (figura 5.16) señalan que hay un conjunto de corrimientos profundos y se encuentra una cuenca post eocena y según Escalona y Mann (2006) hay una subcuenca del Oligoceno-Mioceno. Así como también se observa en RCOLM042, la segunda capa evidencia un adelgazamiento producto del plegamiento que se forma en esa zona.

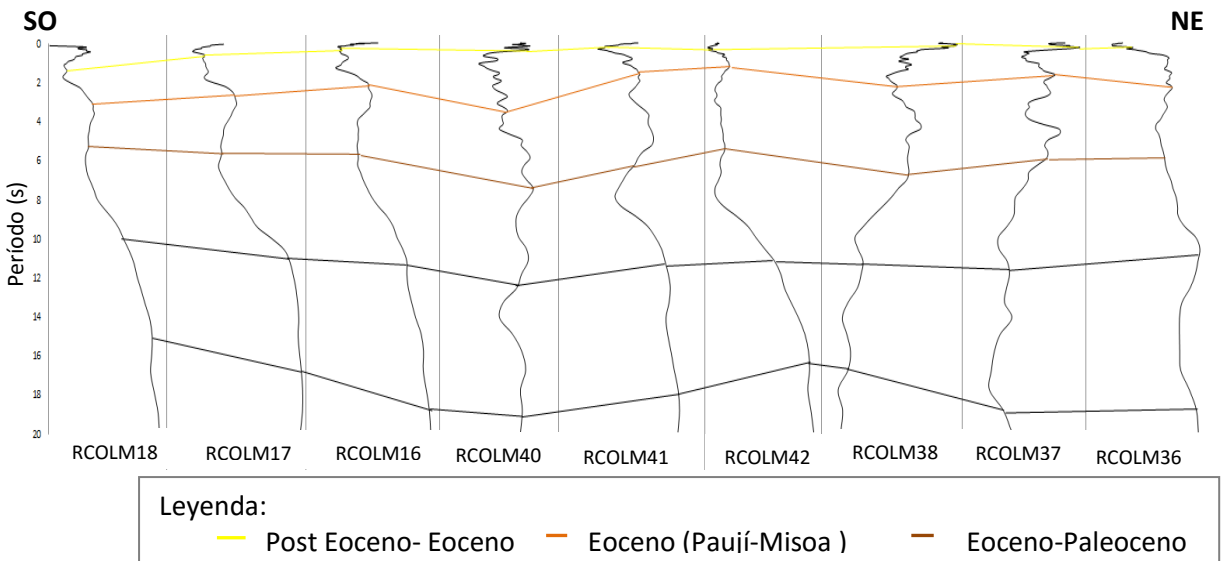


Figura 5.6. Relación entre las amplitudes H/V y la geometría de la cuenca del perfil 2.

**Perfil 3:** con aproximadamente 35 km y 8 estaciones, en la figura 5.7 se observa que este perfil evidencia entre las estaciones RCOLM22 y RCOLM23 un salto de falla, ya que entre ellas se encuentra la falla de Pueblo Viejo, donde el bloque hundido se encuentra al oeste representado por la estación RCOLM22 y el bloque levantado al este por la estación RCOLM23. Igualmente es importante destacar el acortamiento que existe en la segunda capa en la estación RCOLM44 ya que se encuentra en una zona donde la formación del Eoceno se encuentra expuesta a erosión.

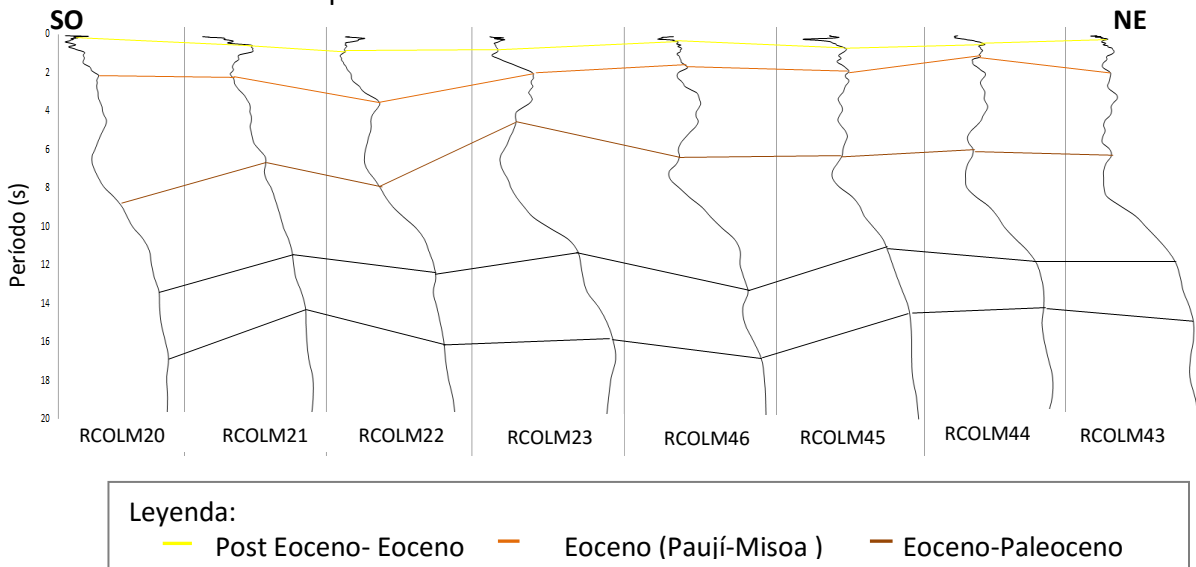


Figura 5.7. Relación entre las amplitudes H/V y la geometría de la cuenca del perfil 3.

**Perfil 4:** con 6 estaciones y 25 km de extensión. En la figura 5.8 se muestra, igualmente que en el perfil 3, como la falla Pueblo Viejo modifica la estructura, esta vez menos evidente, sin embargo se puede apreciar entre las estaciones RCOLM55 y RCOLM56. Además es importante señalar que en este perfil solo se pudieron determinar 4 picos predominantes en la mayoría de las estaciones.

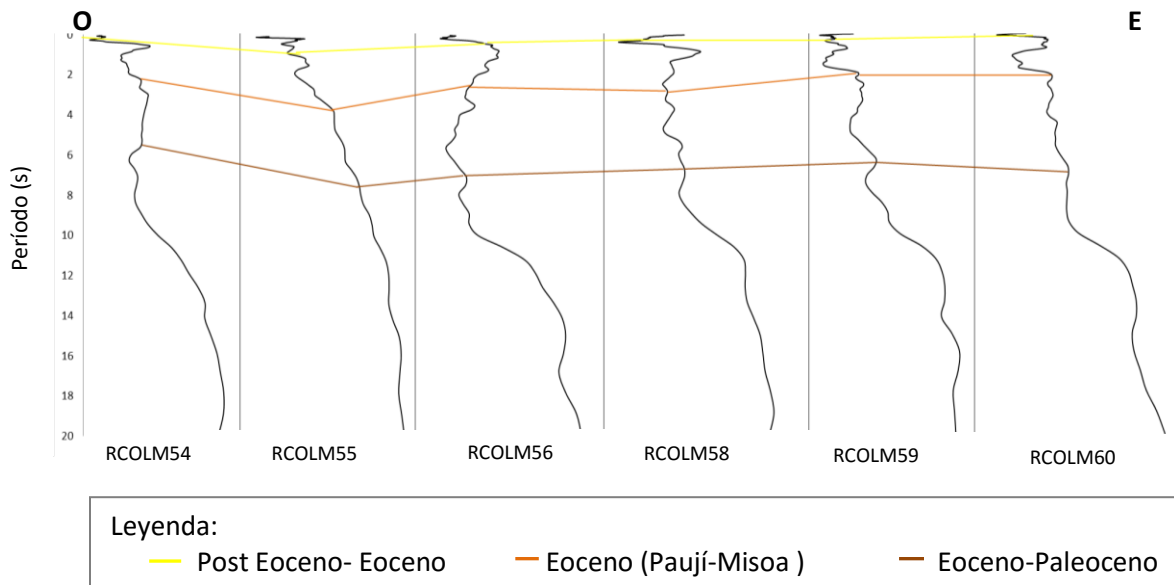
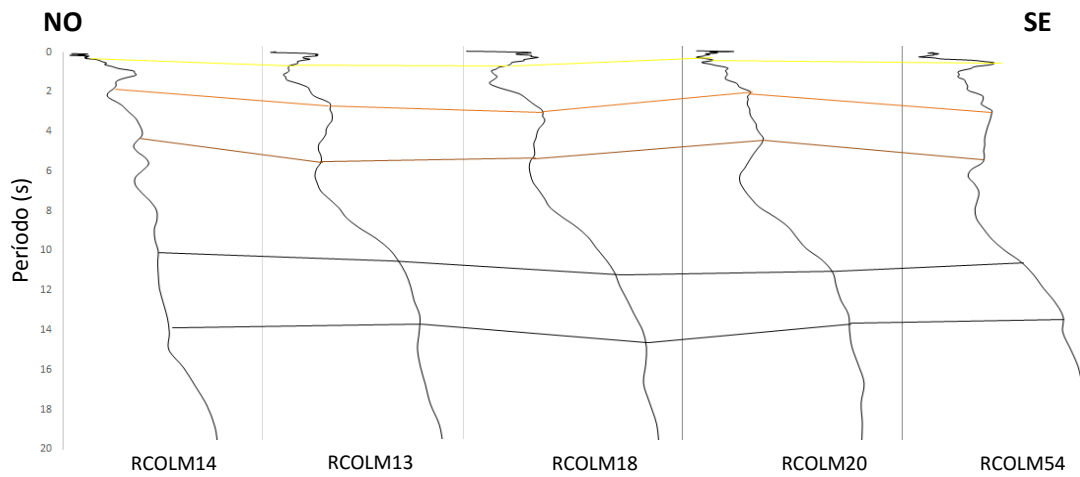


Figura 5.8. Relación entre las amplitudes H/V y la geometría de la cuenca del perfil 4.

**Perfil 5:** este perfil consta de 5 estaciones a orillas del lago en dirección NO, con un aproximado de 27 km. En la figura 5.9 se observa una distribución más lineal de las capas que en el resto de los perfiles, por lo que representa la zona con menor deformación en toda el área de estudio.

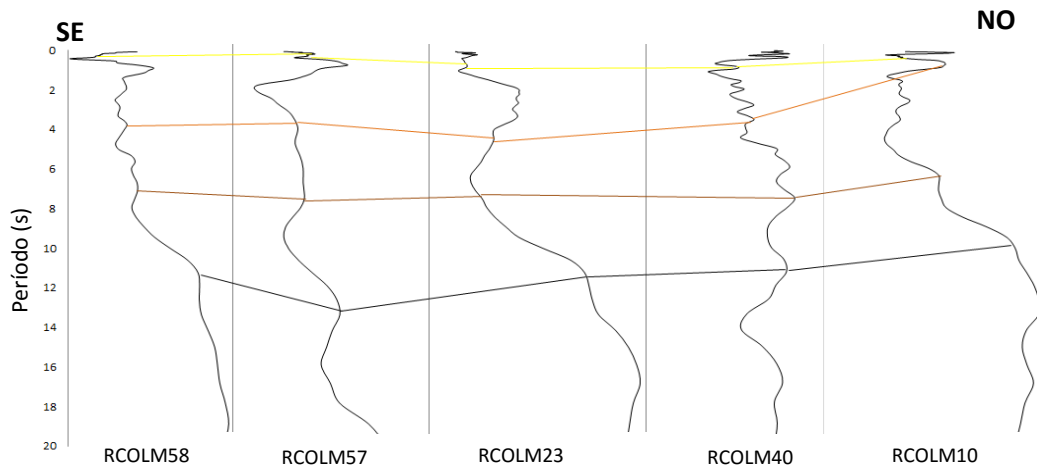


Leyenda:

— Post Eoceno- Eoceno     
 — Eoceno (Paují-Misoa )     
 — Eoceno-Paleoceno

Figura 5.9. Relación entre las amplitudes H/V y la geometría de la cuenca del perfil 5.

**Perfil 6:** se muestra en la figura 5.10 las 5 estaciones que conforman el perfil 6, donde lo más representativo se muestra entre las estaciones RCOLM40 y RCOLM10, donde se observa nuevamente la sub cuenca.



Leyenda:

— Post Eoceno- Eoceno     
 — Eoceno (Paují-Misoa )     
 — Eoceno-Paleoceno

Figura 5.10. Relación entre las amplitudes H/V y la geometría de la cuenca del perfil 6.

### 5.3 MAPAS DE ISOPERÍODOS Y PROFUNDIDAD DE LA BASE DE LAS CAPAS

En la figura 5.11 se muestra el mapa de isoperíodos de la primera capa, donde se obtuvieron valores de periodos entre un rango de 0,18 y 1,97 s. Se observa que los valores de periodos más altos se encuentran al oeste de la falla Pueblo Viejo y toda la zona correspondiente a la orilla del lago de Maracaibo, mientras que el resto del área presenta los valores más bajos del rango de esta capa. Esta respuesta obtenida se ve representada en la figura 5.12, donde se observa que el bloque hundido se encuentra al oeste de la falla. Esta primera interface se asocia al Cuaternario, Neógeno y Oligoceno, hasta donde yace discordante la formación Icotea sobre el Eoceno, con una litología en su mayoría conformada de areniscas, arcillas y lutitas.

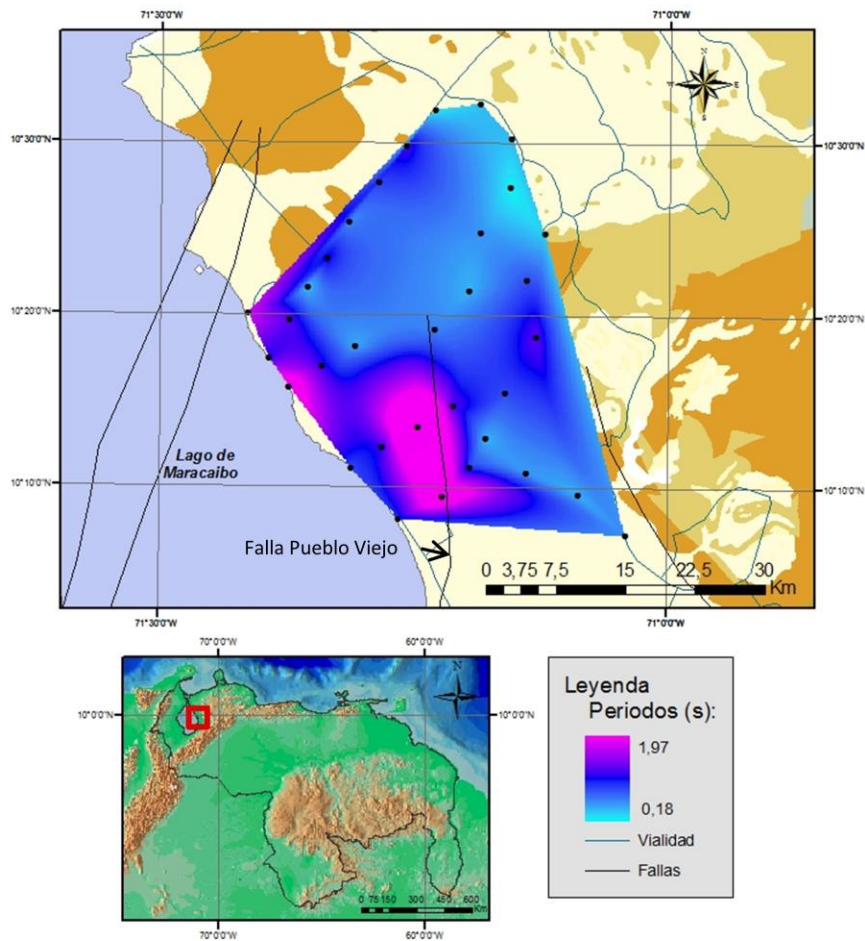


Figura 5.11. Mapa de isoperíodos correspondiente a la primera capa.

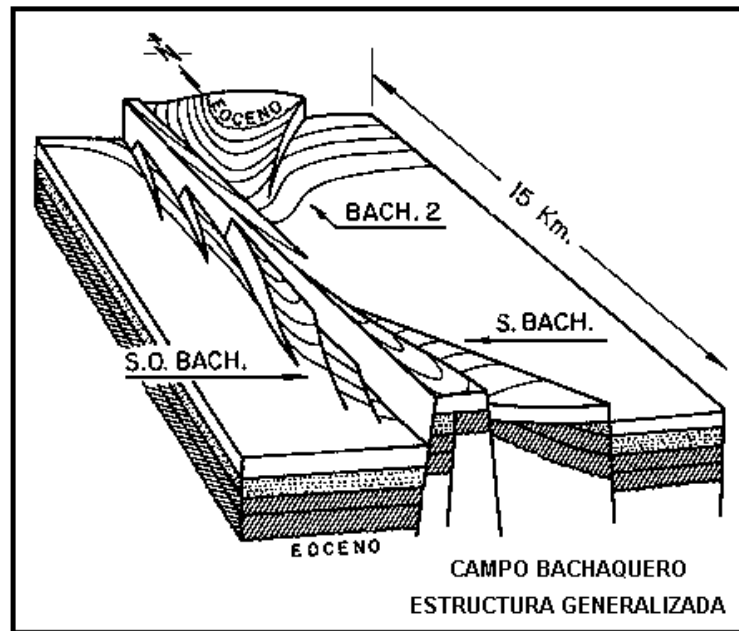


Figura 5.12. Estructura generalizada de la falla Pueblo Viejo (PDVSA-Intevep, 1997)

El valor promedio de velocidad de onda S que fue utilizada para determinar las profundidades a partir de la fórmula de Kramer (1996) fue de 2031 m/s, lo que permitió estimar los valores de la primera capa entre 92 y 1000 metros de espesor. La figura 5.13 muestra el mapa de espesores de esta capa, el cual tiene una gran similitud con el mapa de isoperíodos, ya que el mayor espesor sedimentario se encuentra al oeste de la falla de Pueblo Viejo y a orillas del lago.

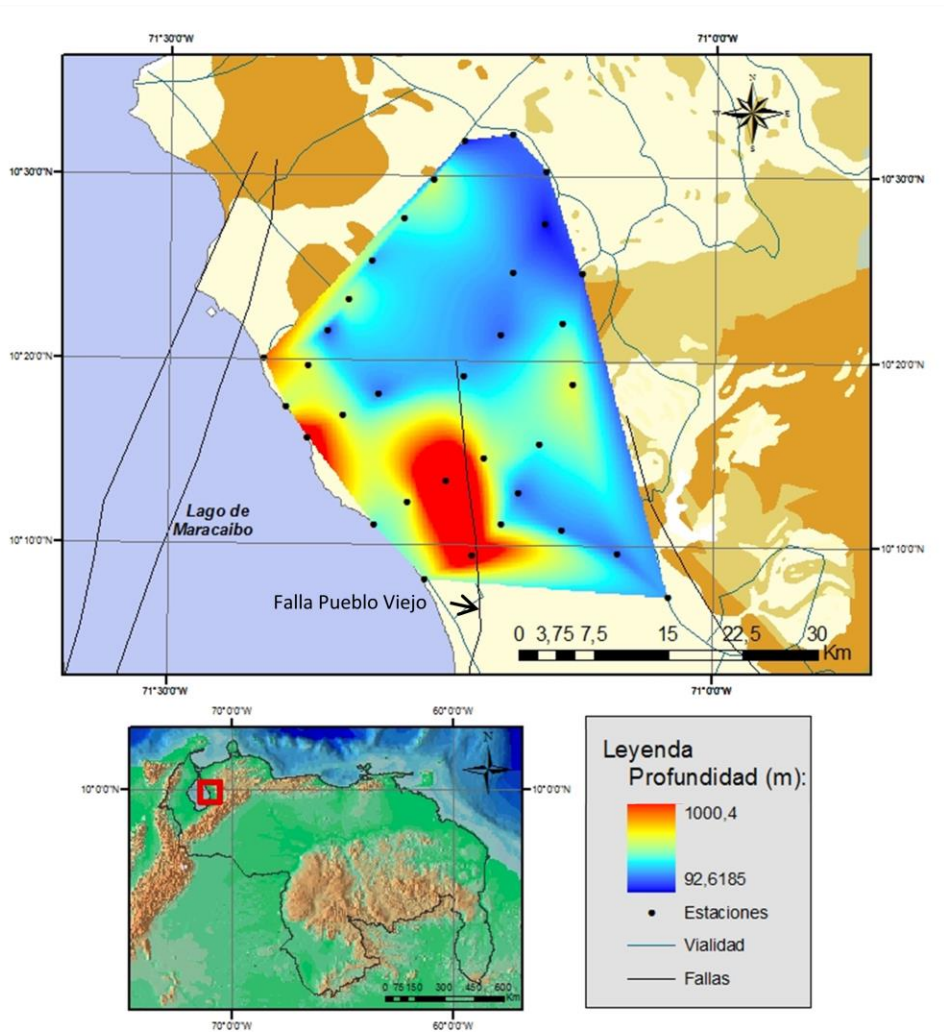


Figura 5.13. Mapa de profundidad de la base correspondiente a la primera capa.

En el mapa de isoperíodos de la segunda capa (figura 5.14) se observa que al igual que en el mapa de isoperíodos de la primera capa las estaciones al oeste de la falla Pueblo Viejo tiene los valores de periodo más alto, hasta de 3,94 s, así como también en las zonas donde se encuentra la sub cuenca y al norte del mapa. En el resto del mapa se observan valores medios a bajos hasta de 1,61 s. Esta capa es correspondiente con el Eoceno superior, específicamente a la formación Paují, cuya litología es básicamente de lutitas.

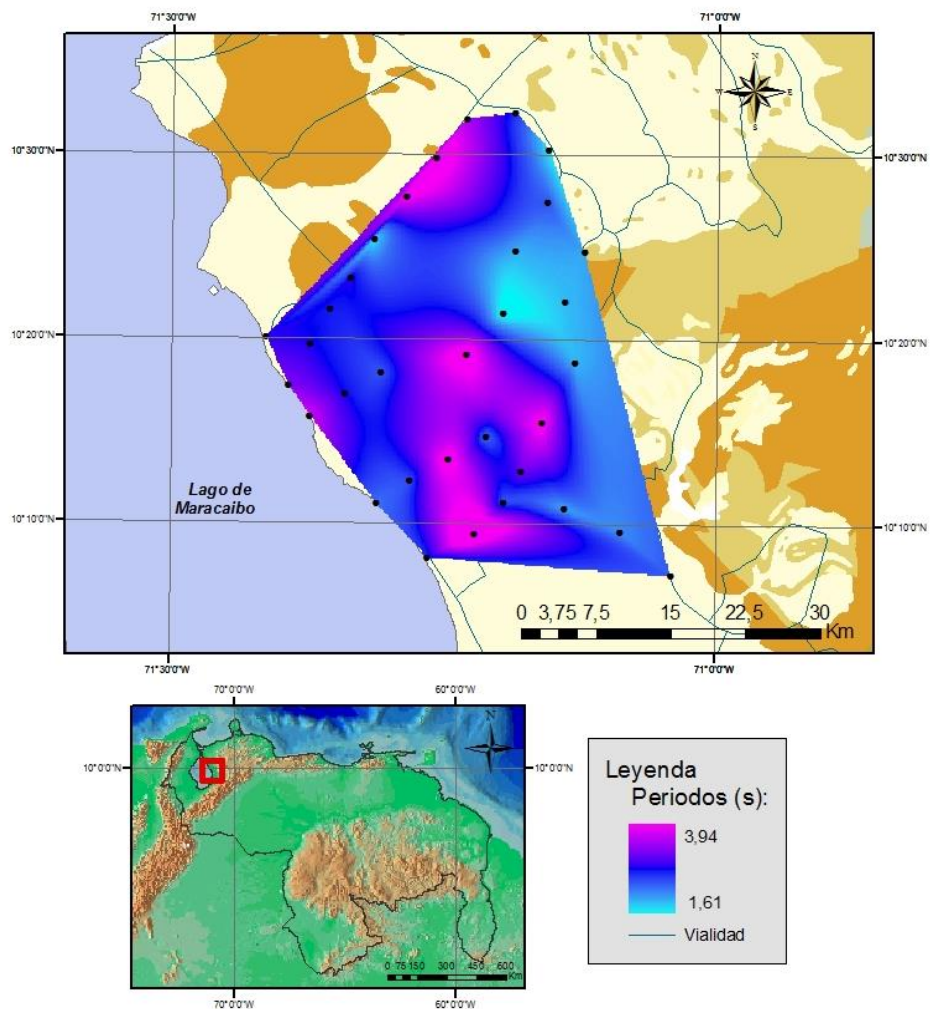


Figura 5.14. Mapa de isoperíodos correspondiente a la segunda capa.

En cuanto al mapa de la segunda capa (figura 5.15), se observa que la formación Paují presenta un rango de profundidades entre 818 y 2003 m, asociando las mayores profundidades y espesores a la zona de la subcuenca (figura 5.16), al oeste de la falla y al norte del mapa. Además, se puede acotar que las zonas donde existe la exposición del Eoceno hay un menor espesor de las mismas, esto debido a la erosión en la formación.

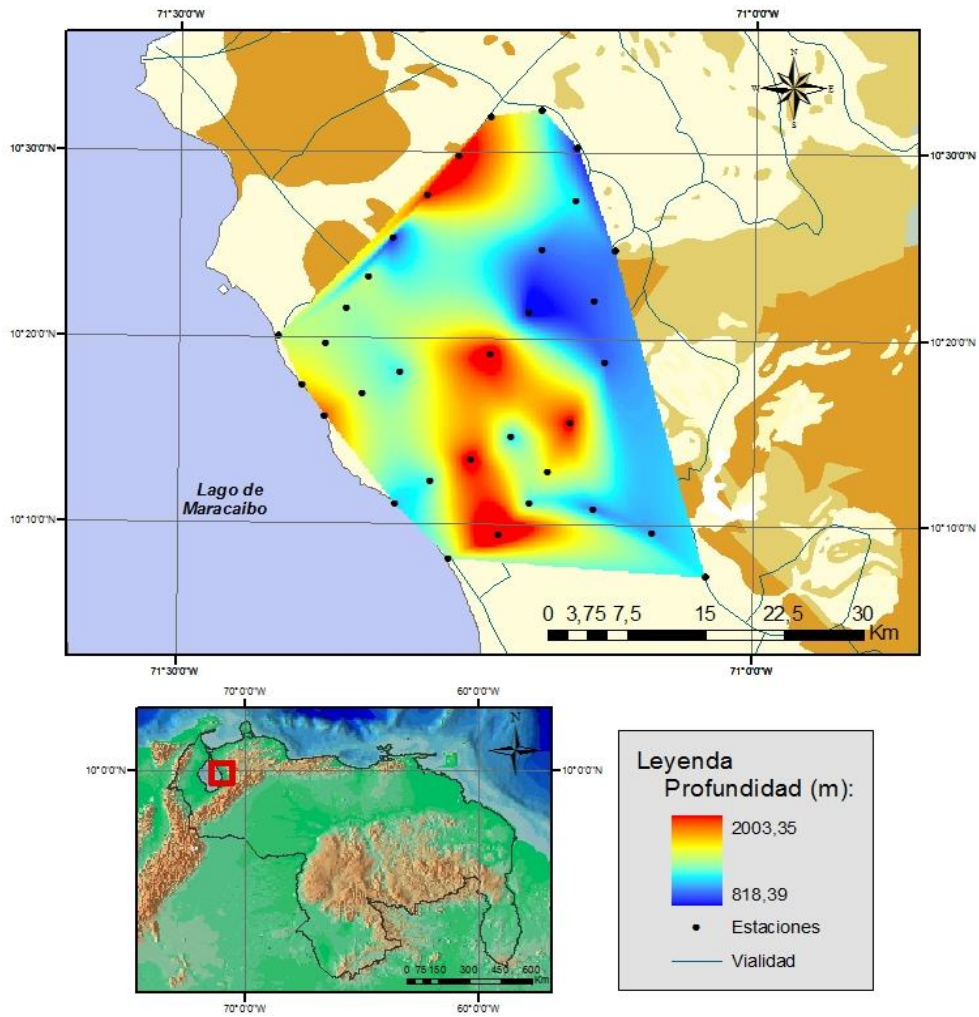


Figura 5.15. Mapa de profundidad de la base correspondiente a la segunda capa.

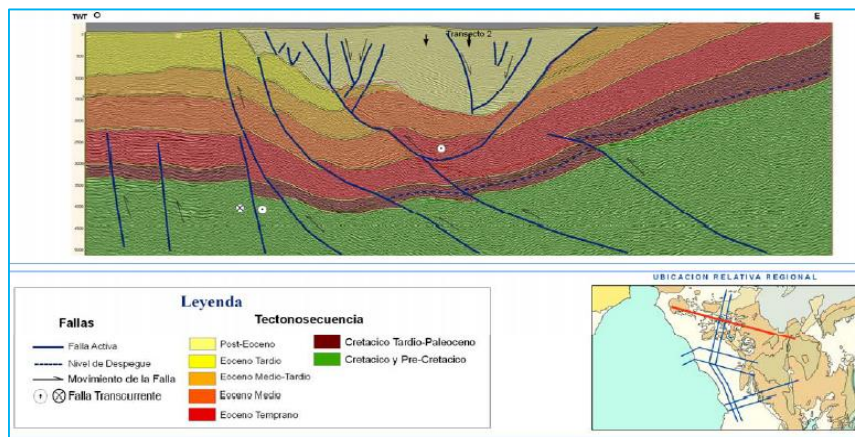


Figura 5.16. Cuenca Post Eocena (Requena y Zambrano, 2008).

La tercera capa corresponde al Eoceno medio a inferior, lo que sería la formación Misoa, compuesta de lutitas, areniscas limolitas y hasta calizas. En la figura 5.17 se muestra que el rango de valores de los periodos corresponde entre 4,52 y 8,58 s, donde el norte y el oeste presentan los valores más bajos del rango y en la sub cuenca y al sur los valores más altos del mismo.

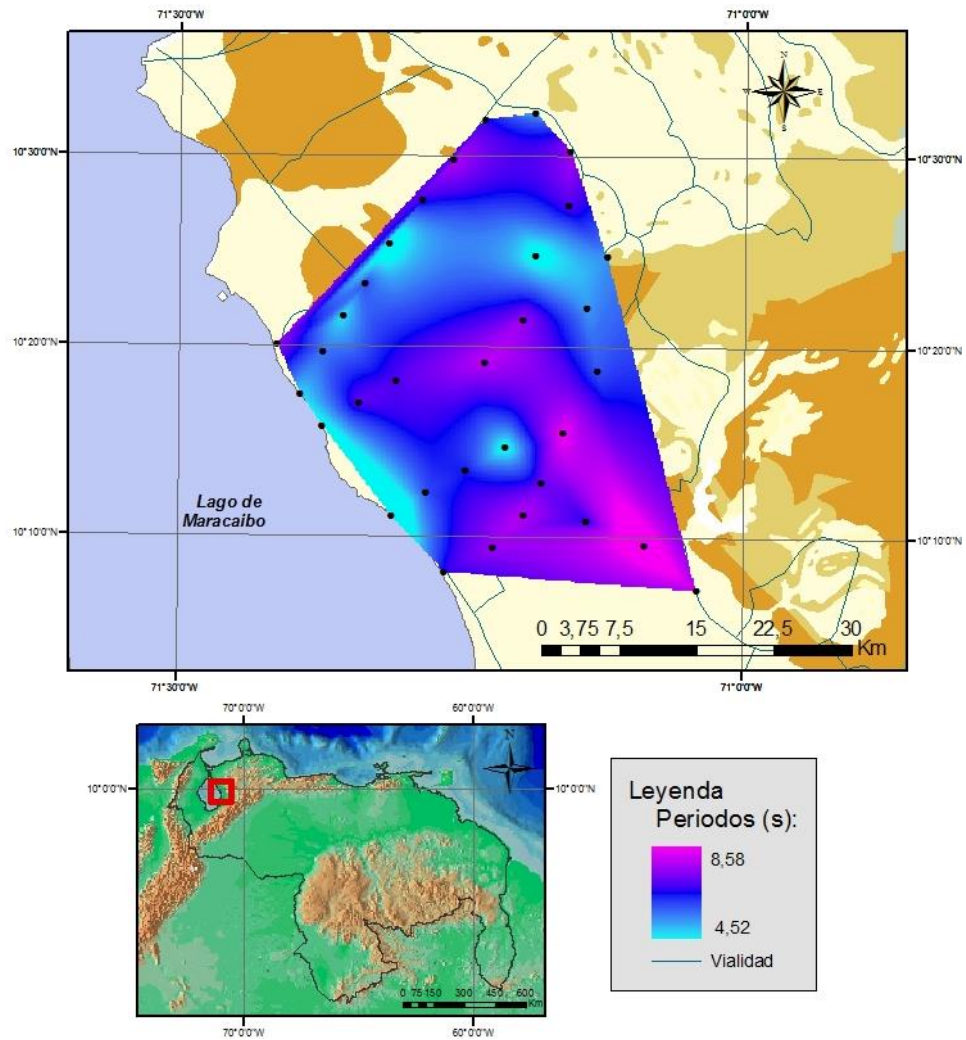


Figura 5.17. Mapa de isoperíodos correspondiente a la tercera capa.

Referente a la profundidad de la base de la tercera capa se observa en la figura 5.18 que las zonas con mínima profundidad hasta de 2297 m se encuentran en su mayoría en la orilla del lago y los mayores espesores, alrededor de 4360 m, se encuentran al sur del mapa entre las estaciones RCOLM59 Y RCOLM60. El resto del área presenta zonas con valores promedios de este rango, exceptuando estaciones puntuales como por ejemplo, RCOLM23 que presenta un menor profundidad; sin embargo, esto se atribuye a que este pico es de gran amplitud (aproximadamente 2 s), ocasionando dificultad al determinar su máximo y por lo tanto la profundidad.

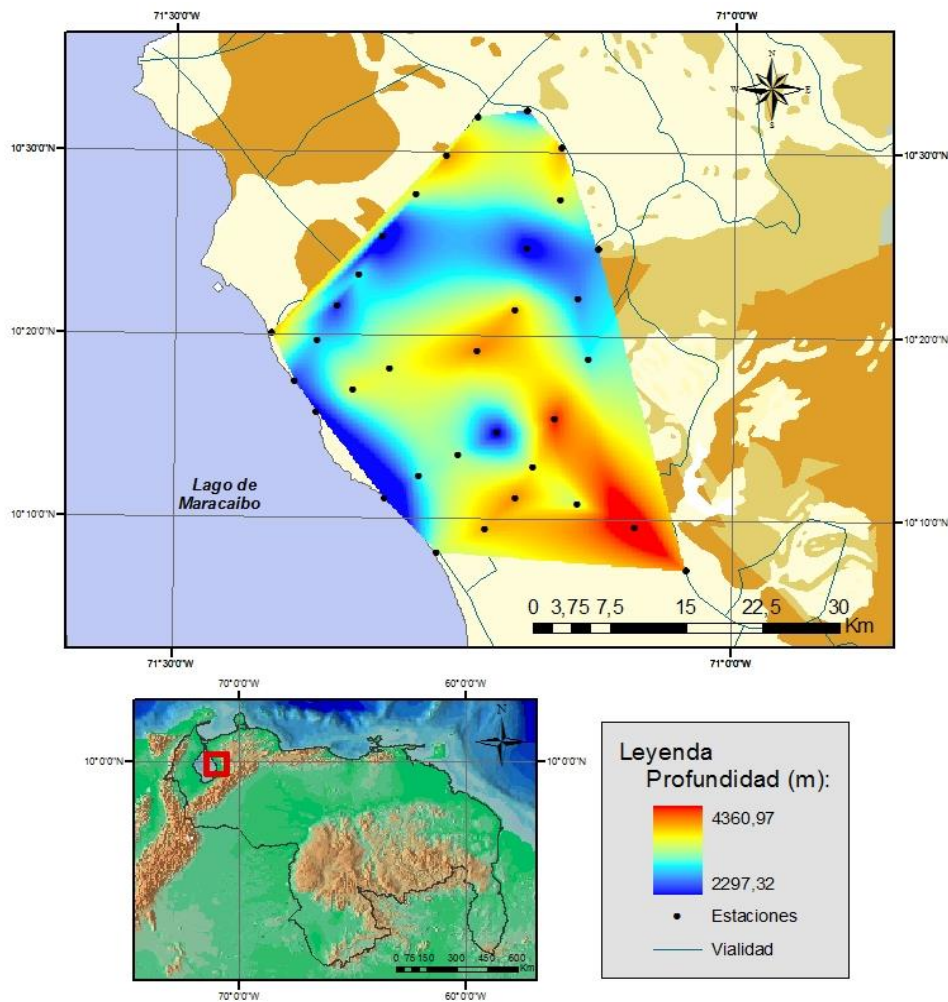


Figura 5.18. Mapa de profundidad de la base correspondiente a la tercera capa.

#### 5.4. INVERSÓN DE LA CURVA DE ELIPTICIDAD

En la figura 5.19.a se observa el gráfico de elipticidad de la estación RCOLM17, que se obtuvo a partir de los parámetros establecidos gracias a la información de los pozos suministrados (PDVSA occidente), donde el máximo de error (*min misfit*) que se aceptó fue de 0,076. Para luego obtener un modelo 1D de cada una de las estaciones de profundidad (m) vs velocidad de onda P (m/s) (figura 5.19.b). En el modelo se observan valores para una primera capa asociada a Post-Eoceno de 449 metros y una velocidad de onda P aproximada de 2600 m/s, luego una segunda capa cuya base se encuentra en 1252 m y velocidades alrededor de 4000 m/s, se estimó como el Eoceno Superior (formación Paují); una tercera capa asociada al Eoceno Medio e Inferior (formación Misoa) que presenta su base en 3569 m y con velocidad promedio de 5100 m/s; finalmente una cuarta capa asociada al Paleoceno, la formación Guasare, ya que ésta presenta velocidades más bajas con respecto al Eoceno y el Cretácico según los registros sísmicos y se ve representada con una base en 3949m y con velocidades alrededor de los 4000 m/s, por lo tanto este límite representaría el tope del Cretácico.

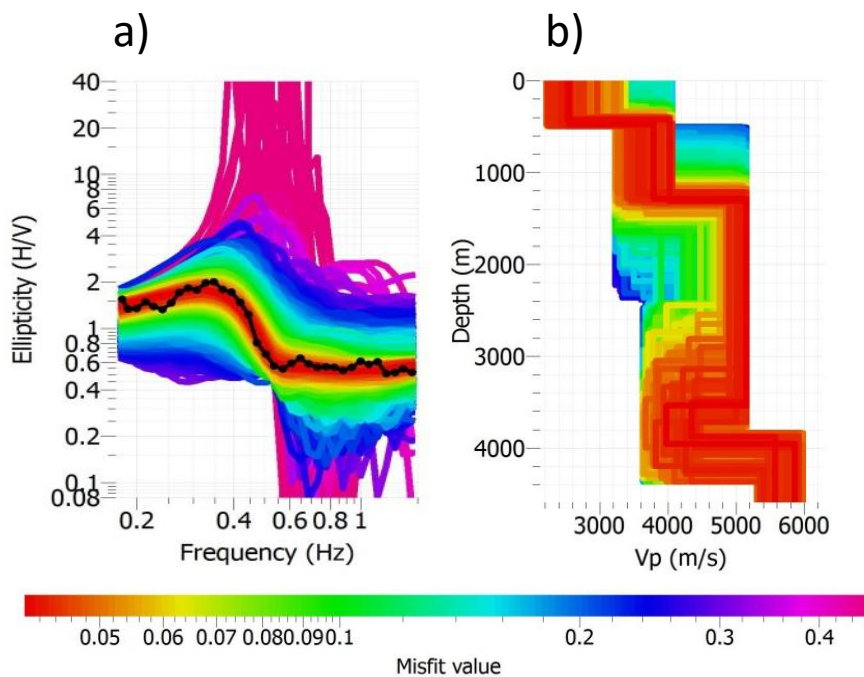


Figura 5.19. Curva de elipticidad y modelo 1D de la estación RCOLM17.

Con la finalidad de mostrar los resultados obtenidos a partir de la inversión se realizaron los mismos perfiles que se mostraron en la figura 5.4 pero ahora con los valores de profundidad obtenidos en cada uno de los modelos de inversión de las estaciones. El perfil 1 se muestra en la figura 5.20, en el cual se observa con mayor relevancia la zona donde hay una exposición del Eoceno entre las estaciones RCOLM11 Y RCOLM6, ya que la zona se encuentra plegada debido a grandes esfuerzos compresivos que existen en el área. Además se muestra como la profundidad del tope del Cretácico varía en la zona desde 3100 m como lo más somero y 4200 m lo más profundo de dicho perfil.

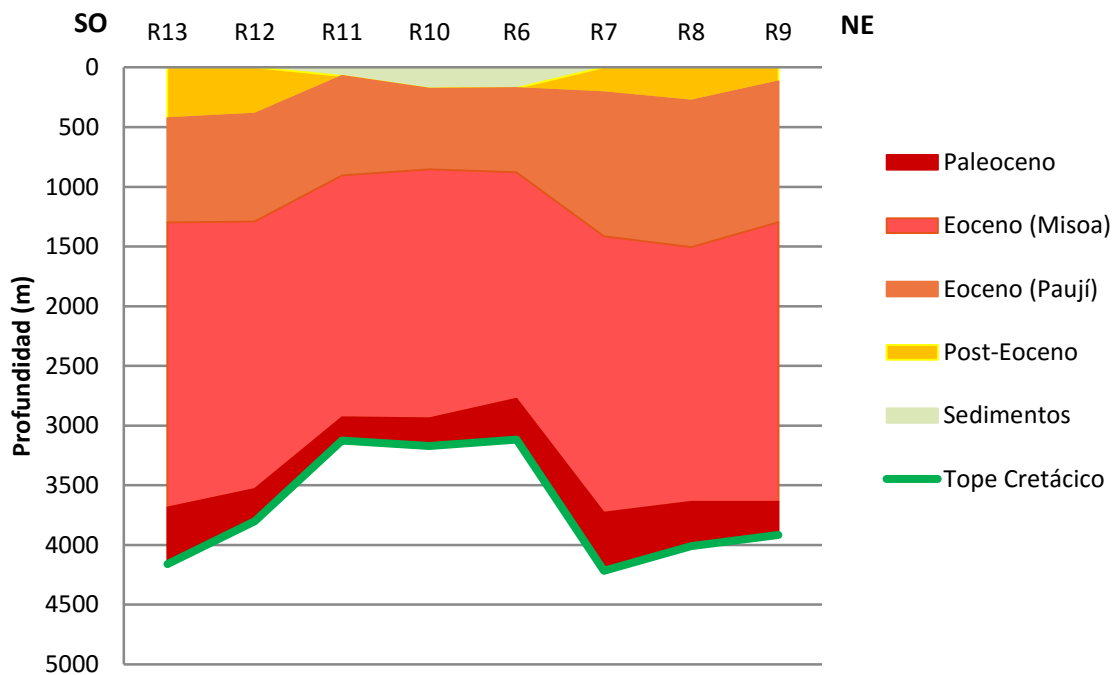


Figura 5.20. Perfil 1 a partir de inversión de elipticidad.

En cuanto al perfil 2 (figura 5.21) se pueden señalar dos rasgos importantes, el primero representado por la estación RCOLM40 ya que en esa zona se encuentra, como ha sido antes mencionado, una subcuenca por lo que se observa un engrosamiento del Eoceno en esa zona; el segundo sería la estación RCOLM38 ya que no se pudo obtener un modelo de inversión en este punto, ninguno de los parámetros utilizados logró representar la

estratigrafía en esa zona. El tope del Cretácico tiende a ser más constante en este perfil con valores alrededor de 4000 m de profundidad.

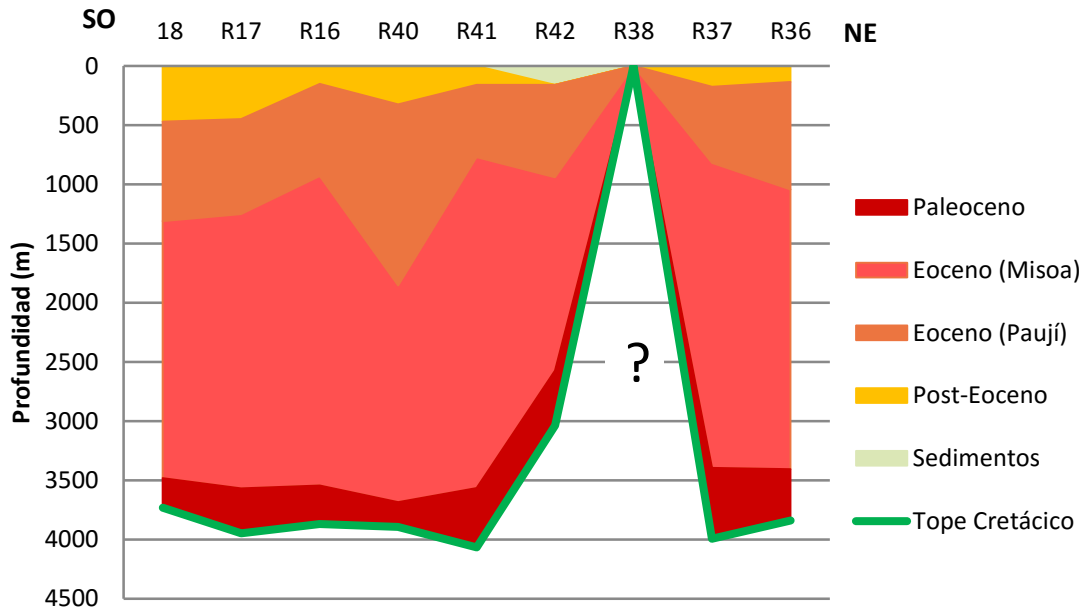


Figura 5.21. Perfil 2 a partir de inversión de elipticidad.

El perfil 3 (figura 5.22) muestra claramente el impacto que generó la falla de Pueblo Viejo en la estratigrafía de la zona, causando así que el área donde se encuentra la estación RCOLM22 tenga una mayor carga sedimentaria, ya que éste representa el bloque hundido. Luego se observa otra deformación, ocasionando que el Eoceno quede expuesto y por tanto erosionado entre las estaciones RCOLM44 Y RCOLM43. El tope del Cretácico varía según las deformaciones existentes, entre 3000 y 4000 metros de profundidad.

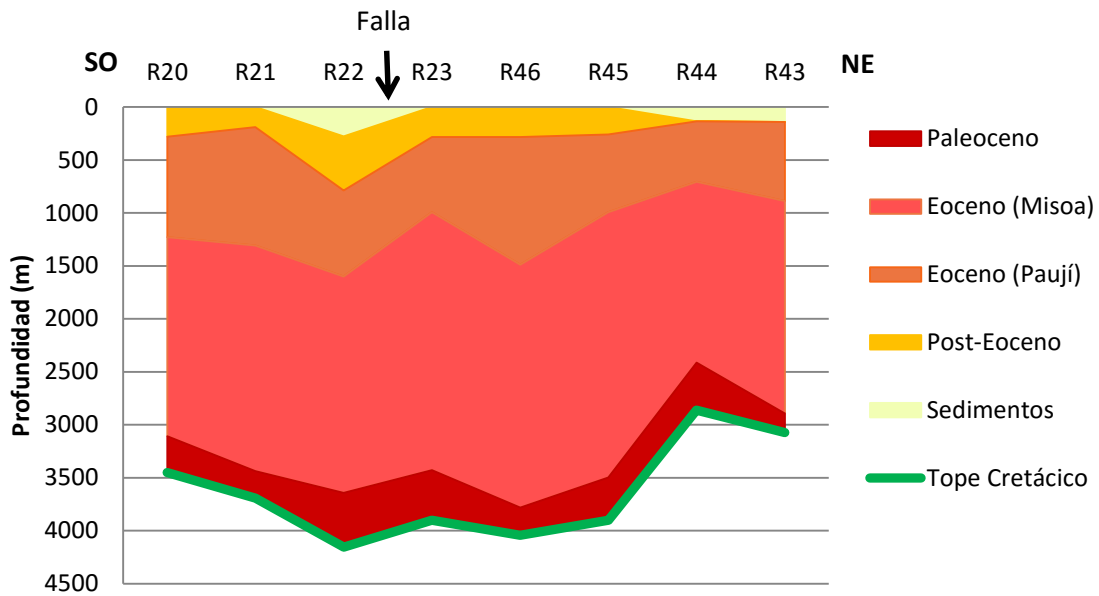


Figura 5.22. Perfil 3 a partir de inversión de elipticidad.

El perfil 4 (figura 5.23) al igual que el 3 corta perpendicularmente la falla entre las estaciones RCOLM55 Y RCOLM56, además se puede observar la presencia de más deformaciones en el resto del área. El tope del Cretácico varía alrededor de los 4000 metros.

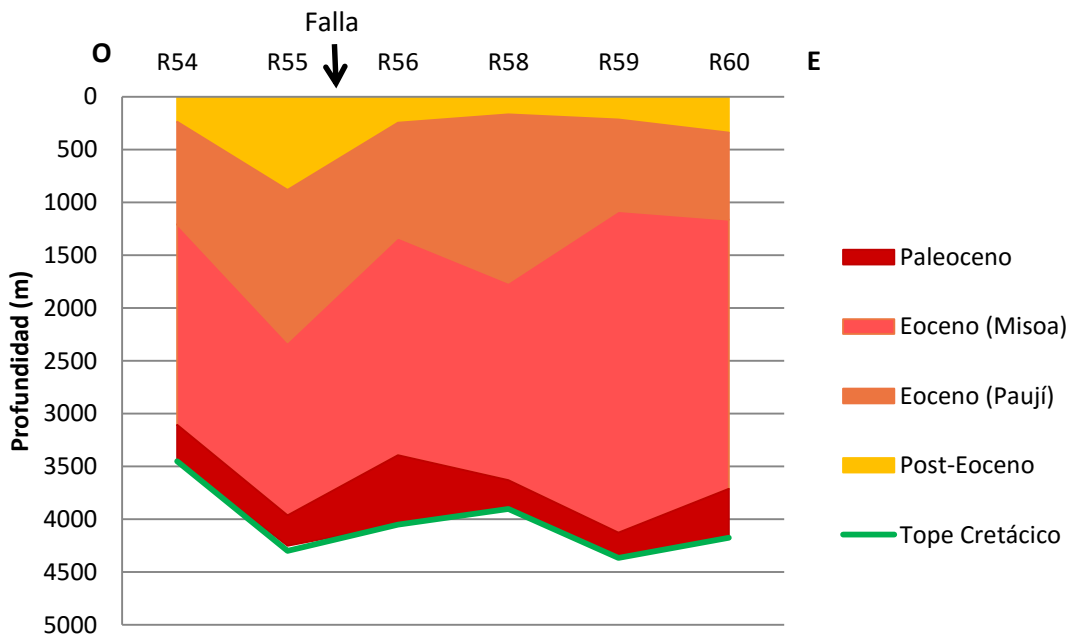


Figura 5.23. Perfil 4 a partir de inversión de elipticidad.

El perfil 5 (figura 5.24) con una dirección NO a orillas del Lago de Maracaibo, es la zona que presenta menor deformación, donde el tope del Cretácico varía entre 3400 y 4300 m de profundidad.

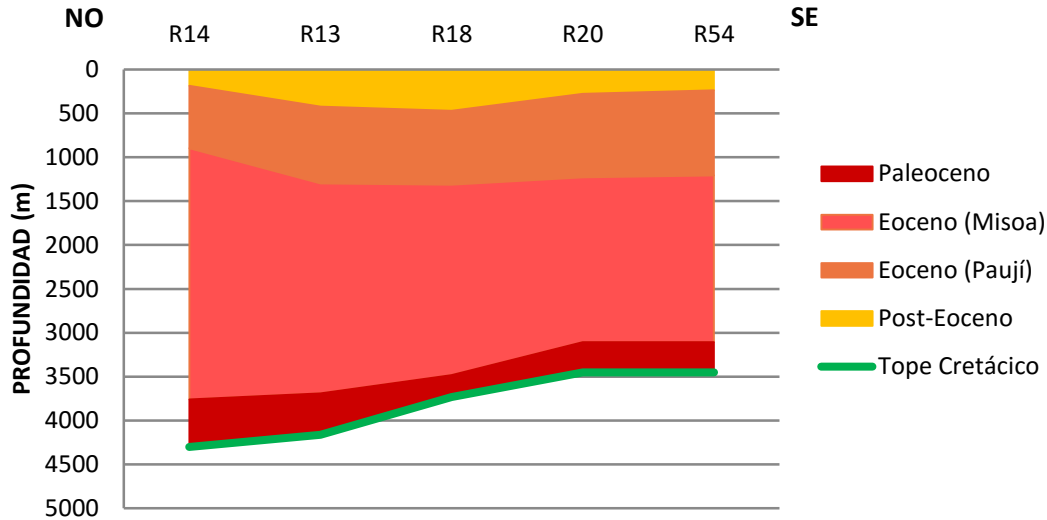


Figura 5.24. Perfil 5 a partir de inversión de elipticidad.

Finalmente en la figura 5.25 se muestra el perfil 6, con la finalidad de mostrar la variación en sentido SE, se observa la presencia de las estructuras antes mencionadas, como la subcuenca en la estación RCOLM40.

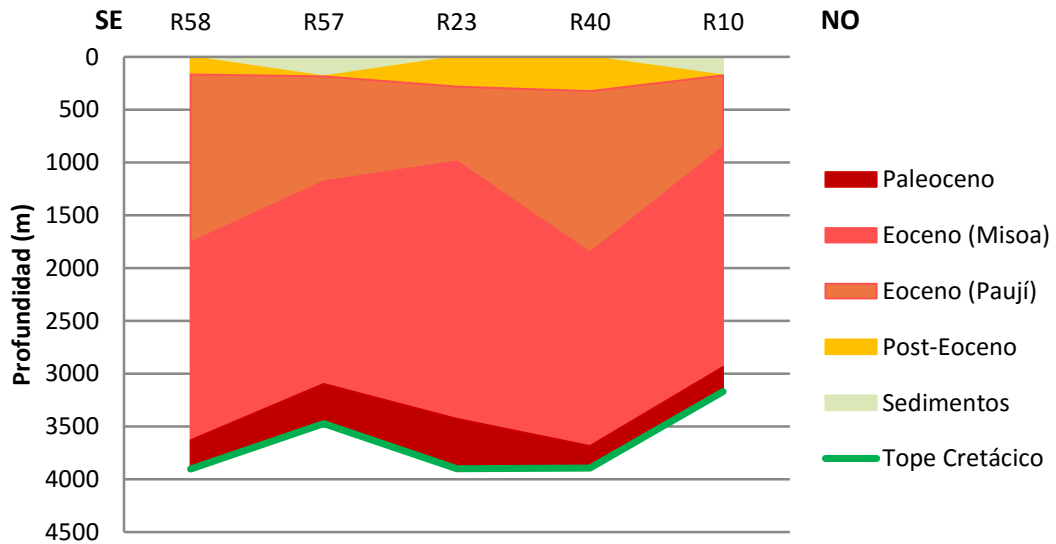


Figura 5.25. Perfil 6 a partir de inversión de elipticidad.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos de las mediciones de ruido ambiental, tanto de los espectros de relación H/V como de la inversión de la curva de elipticidad, se puede concluir lo siguiente:

- La adquisición de ruido sísmico ambiental, además de ser un método de fácil implementación y de bajo costo, goza del beneficio que su procesamiento puede ser realizado a partir de varias técnicas, como es el caso de la presente investigación donde se hizo uso del método Nakamura y de la Inversión de la elipticidad de la onda, no obstante, sirve como complemento para otras técnicas como la reflexión y la refracción.
- En el análisis de los espectros H/V, se obtuvieron 5 picos fundamentales, el primero entre 0,1 y 1,8 s, el segundo de 1,8 y 3,4 s, el tercero entre 6,7 y 8,4 s, luego de 11,7 y 13,3 s y finalmente una quinta entre 16,7 y 18,3 s. Sin embargo, en los últimos dos picos mencionados existe una incertidumbre en los valores de H/V, producto del tipo de equipo utilizado (sismómetro de 30 s) y el tiempo de grabación.
- Los picos pertenecientes a la tercera capa, en la mayoría de las estaciones, se observó que estos poseían una gran amplitud, de 2 s o más, lo que fue asociado a la transición del Paleoceno al Cretácico, ya que su espesor (formación Guasare) no presenta más de 500 m.
- Con la fórmula de Brocher (2005) fueron estimadas las velocidades de onda S tanto para la determinación de espesor sedimentario mediante la fórmula de Kramer (1996) donde se obtuvo una velocidad promedio de 2031 m/s, como para obtener los parámetros de Vs en la inversión a partir de los registros de pozo sísmico.

- Los mapas de espesores de la primera capa mostraron valores entre y de 92 a 1000 metros, donde los valores mínimos se encuentran en su mayoría al norte del mapa; los máximos se encuentran a orillas del lago de Maracaibo y al oeste de la falla Pueblo Viejo, ya que éste representa el bloque hundido de dicha falla. Esta primera interface se asocia al Cuaternario, Neógeno y Oligoceno (Post- Eoceno).
- Para la segunda capa se obtienen valores de profundidad entre 800 y 2000 m, asociada a la formación Paují del Eoceno Superior, donde sus mínimos están asociados a la erosión de la misma en sus afloramientos debido a una considerable deformación que expone estas rocas; y los máximos se observan en la cuenca post Eocena según Requena y Zambrano (2008) e igual que en la capa uno, al oeste de la falla de Pueblo Viejo.
- La tercera capa se asocia a la formación Misoa del Eoceno Medio a Inferior, presentado profundidades entre 2200 y 4300 m. Los mayores espesores se concentran en el piedemonte andino (zona sur) y sus mínimos a orillas del lago, donde se pudo apreciar a través del perfil 5 la uniformidad de esas capas en esa zona.
- Se determinó la curva de elipticidad a partir del método *RayDec*, que posteriormente se utilizó para realizar la inversión donde se obtuvo un valor máximo de error (*min misfit*) de 0,076 entre las 32 estaciones en la que se realizó la inversión.
- Las profundidades del tope del Cretácico varían a lo largo de toda la zona de estudio, esto debido a las grandes deformaciones geológicas presentes. Sin embargo, a partir de ambos métodos se observaron similitudes en cuanto a las profundidades de las capas estudiadas, quedando en evidencia la utilidad de los métodos para determinar altos contrastes litológicos, a grandes profundidades. A partir de los espectros H/V se obtuvieron valores de profundidad para los picos considerados en la transición entre Paleoceno a Cretácico de 2200 a 4300 m en toda el área de estudio; en cuanto a los valores obtenidos a través de la inversión de la curva de elipticidad para el tope del Cretácico es de 2800 a 4300 m de profundidad.

Con base a los resultados obtenidos y las conclusiones establecidas, se recomienda:

- En cuanto a la adquisición, realizar una verificación diaria de las señales obtenidas, de manera que haya sido registrada correctamente, de lo contrario, poder solventar cualquier problema que haya originado la falla aún estando en campo.
- En cada estación a medir, dejar el equipo estabilizándose un tiempo previo, como mínimo 5 minutos, para tener una mejor calidad de registro.
- En caso de querer realizar estudios a mayor profundidad que la obtenida en la investigación se recomienda un sismómetro con mayor ancho de banda y un tiempo de grabación mayor a 40 min.
- Apoyar el estudio con información acerca de la geología de la zona y registros de pozos, ya que con una mayor cantidad de información la inversión de la curva de elipticidad resulta con mayor facilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abeki, N., Enomoto, T., Guevara, T., Villegas, Z. (1995). Fundamental concept for Seismic microzonation and preliminary surveys of microtremor observations in Caracas and Cumaná City, Venezuela. II Coloquio Internacional sobre "Microzonificación Sísmica" y V Reunión de Cooperación Iberoamericana, Cumaná, Venezuela, 12 al 16 de junio de 1995, Resumen.
- Abeki, N., Seo, K., Matsuda, I., Enomoto, T., Watanabe, D., Schmitz, M., Rendón, H., Sánchez, A., (1998b). Microtremor observations in Caracas city, Venezuela. In: Irikura et al. (eds.), *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Balkema, Rotterdam, 619-624
- Abeki, N., Watanabe, D., Hernández, A., Pernía, A., Schmitz, M., Avendaño, J, (1998a). Microtremor observations in Cumaná city, Venezuela. In: Irikura et al. (eds.), *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Balkema, Rotterdam, 613-618.
- Alarcón, A. (2007). Control sedimentológico en la distribución de fluidos, norte del campo Lagunillas tierra, yacimiento laguna superior campo. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Alfaro A., J. J. Egozcue y A. Ugalde (1999). Determinación de características dinámicas del suelo a partir de microtemblores. Proc. Primer Congreso Nacional de Ing. Sísmica. Murcia. España. 2:435-441.
- Asmussen, J. C. (1997), *Modal analysis based on the random decrement technique*, Ph.D. thesis, Univ. of Aalborg, Aalborg, Denmark.
- Asten, M.W., Henstridge, J.D., (1984). Arrays estimators and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins. *Geophysics* 49(11), 1828–1837.
- Audemard, F., Gonzalez, M., Malavé, G. (2015). Principales avances en la caracterización sismogénica y la evaluación de eventuales deformaciones permanentes de origen cosísmico, asociadas con la falla Pueblo Viejo dentro del bloque triangular de Maracaibo del Occidente Sur caribeño. ISSN 2346-4119.
- Brocher, T. (2005). *Compressional and Shear Wave Velocity Versus Depth in the San Francisco Bay Area, California: Rules for USGS Bay Area Velocity Model 05.0.0*. Open-File Report 05-1317. California, U.S.

- Calderón, J. (2016). Modelado gravimétrico 2½D del perfil Burro Negro ubicado en el noroccidente de Venezuela. Trabajo especial de Grado no publicado. Universidad Simón Bolívar, Caracas.
- Daza, F. (2014). Caracterización geofísica del área sureste de la cuenca de Maracaibo, mediante la adquisición de ruido sísmico ambiental utilizando el método de Nakamura. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Escalona, A. y Mann, P. (2006). Tectonic controls of the right-lateral Burro Negro tear fault on Paleogene structure and stratigraphy, northeastern Maracaibo Basin. AAPG Bulletin, v. 90, no. 4 , pp. 479–504.
- Flores-Estrella, H., Lomnitz C. y Yussim S. (2004). Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC. Geos. Vol. 24. Nº 3, p: 438-445.
- Garmin. <http://www.garmin.com>
- García, A. (2010). Desarrollo y evaluación de métodos avanzados de exploración sísmica pasiva. Tesis Doctoral. Almería, España.
- García, J. (2014). Caracterización geofísica del área noroeste de la cuenca Barinas-Apure (estado Barinas) mediante el análisis de microtemores (método de Nakamura). Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- González De Juana, C., Iturralde, J.M., y Picard, X. (1980). *Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas*. Caracas: Foninves.
- González, E. (2007). Modelo estratigráfico 3d de la formación misoa b-sup y b-6 (Eoceno), ubicado en el campo Costanero Bolívar, área Cabimas, edo. Zulia. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- González, J., Schmitz, M., Audemard, F.A., Contreras, R., Mocquet, A., Delgado, J., De Santis, F., (2004). Site and induced effects associated with the 1997 Cariaco earthquake. Engineering Geology 72(1-2): 143-177.
- Geopsy home: software applications for ambient vibration techniques (2005). <http://www.geopsy.org/documentation/geopsy/hv.html>
- Gutenberg, B. (1958). Microseisms. Advances in Geophysics 5, 53-92.

- Hackley, P., Urbani, F., Karlsen, A. y Garrity, C. (2006). Mapa Geológico de Venezuela a Escala 1:750,000. U.S. Geological Survey Open File Report 2006-1109.
- Hobiger, M., Bard, P.-Y., Cornou, C. & Le Bihan, N., (2009). Single station determination of Rayleigh wave ellipticity by using the random decrement technique (RayDec), *Geophys. Res. Lett.*, 36, L14303, doi:10.1029/2009GL038863.
- Humire, F. (2013). Aplicación de métodos geofísicos basados en ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelos. Aplicación a la microzonificación sísmica del norte y poniente de Santiago. Magister en Ciencias de la Ingeniería. Santiago de Chile, Chile.
- Jaramillo A., Piña J, Aguilar R. (2012). Aplicación del método de cocientes espectrales para la reconfiguración detallada del mapa de Isoperiodos en la cuenca del valle de México. Cancún, México.
- Kramer, S. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.
- Laguado, L. (2015). Caracterización geofísica del área suroeste de la cuenca Barinas – Apure a partir de la aplicación del método de Nakamura. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Louie, J. N. (2001). Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 91, 347-364.
- Macero, R. (2014). Caracterización geofísica mediante estudios de ruidos sísmico ambiental, en el área suroeste de la cuenca de Maracaibo. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Moralis J. González R., Franck A. Audemard M., Gustavo J. Malavé B. Principales avances en la caracterización sismogénica y la evaluación de eventuales deformaciones permanentes de origen cosísmico, asociadas con la falla Pueblo Viejo dentro del bloque triangular de Maracaibo del Occidente sur Caribeño. PDVSA - Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. Venezuela.
- Murria J. 1992. Desarrollo reciente en la evaluación del riesgo sísmico en el occidente de Venezuela. Informe por asesoría para estudios de ingeniería. MARAVEN: 1-29 p.

- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report Railway Technology Research Institute*. 30 (1), 25-30.
- Nogoshi, M. e Igarashi, T. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2). *Journal Seismic Society of Japan*. (24), 26-40.
- PDVSA Intevep (1997). Recuperado de: <http://www.pdvsa.com/lexico/camposp/cp023.htm>
- PDVSA Intevep (2011). Recuperado de: <http://www.pdv.com/lexico/>
- Pérez, C. (2009). Modelo estructural del subsuelo a partir de la integración de datos geofísicos en un área ubicada al sur de la ciudad de Cabimas del estado Zulia. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central, Caracas, Venezuela.
- Poggi, V., Fah, D., Burjanek, J., Giardini, D. (2012). The use of Rayleigh-wave ellipticity for site-specific hazard assessment and microzonation: application to the city of Lucerne, Switzerland. Swiss Seismological Service, Institute of Geophysics, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.
- REF TEK (2011). Folleto de especificaciones. Recuperado de <http://www.Reftek.com/products/seismic-recorders-130-01.htm>.
- Requena, J. y Zambrano, M. (2008). Generación de un modelo geológico estructural a partir de datos sísmicos 2D de la región central de Zulia Oriental. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas
- Rocabado, V. (2012). Tutorial del uso del equipo Reftek-130 para estudios de ruido ambiental. Trabajo no publicado. FUNVISIS. Caracas, Venezuela.
- Romero, M., Cragno, A., Ambrosio, R., Schmitz, M., González, J., (2006). Evaluación geofísica de los conos aluviales en Macuto, Caraballeda y Tanaguarena, Edo. Vargas. *Boletín Técnico IMME* Vol. 44 (1), 16-29.
- Sambridge, M. (2001). Finding acceptable models in nonlinear inverse problems using a neighbourhood algorithm. *Inverse Problems*, 17, 387–403.
- Site Effects assesment using AMBient Excitations (SESAME) (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation. *European Research Project*.

- Xia, J., Miller, R. y Park, C. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversión of Rayleigh waves. *Geophysics*. 64 (3). 691-700.
- Yoris, F. y Ostos, M. (1997). *Geología de Venezuela: geología general y sus cuencas petrolíferas*. WEC 1997. Schlumberger, pp. 44. Caracas, Venezuela.
- Young C.J., Chael E.P., Withers M.M., Aster R.C. (1996). A comparison of the high-frequency (>1 Hz) surface and subsurface noise environment at three site in the United States, *Bull.Seism. Soc. Am.* 86, 1516-1528.

## **APÉNDICE A**

Datos de periodos fundamentales y profundidades estimadas.

PERFIL 1											
Estación	Coordenadas		1° Pico			2° Pico			3° Pico		
	Latitud	Longitud	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)
RCOLM13	10,291	-71,392	1,54	0,65	330,04	0,36	2,81	1426,78	0,18	5,69	2889,10
RCOLM12	10,328	-71,372	1,35	0,74	375,74	0,40	2,51	1274,45	0,16	6,17	3132,82
RCOLM11	10,360	-71,355	3,85	0,26	132,02	0,41	2,45	1243,99	0,18	5,58	2833,25
RCOLM10	10,388	-71,336	1,49	0,67	340,19	0,39	2,54	1289,69	0,16	6,39	3244,52
RCOLM06	10,423	-71,315	2,63	0,38	192,95	0,57	1,75	888,56	0,20	4,93	2503,21
RCOLM07	10,461	-71,286	1,89	0,53	269,11	0,30	3,34	1695,89	0,15	6,85	3478,09
RCOLM08	10,496	-71,258	1,43	0,70	355,43	0,28	3,55	1802,51	0,13	7,52	3818,28
RCOLM09	10,532	-71,231	5,26	0,19	96,47	0,33	3,00	1523,25	0,15	6,79	3447,62

Estación	4° Pico			5° Pico		
	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)
RCOLM13	0,08	13,05	6626,14	0,06	16,44	8347,41
RCOLM12	0,09	11,12	5646,18	0,07	14,93	7580,71
RCOLM11	0,10	10,00	5077,50	0,06	16,25	8250,94
RCOLM10	0,08	11,84	6011,76	0,06	16,81	8535,28
RCOLM06	0,09	11,53	5854,36	0,07	15,03	7631,48
RCOLM07	0,09	10,55	5356,76	0,06	15,61	7925,98
RCOLM08	0,08	12,09	6138,70	0,06	16,56	8408,34
RCOLM09	0,09	11,16	5666,49	0,07	15,07	7651,79

PERFIL 2											
Estación	Coordenadas		1° Pico			2° Pico			3° Pico		
	Latitud	Longitud	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)
RCOLM018	10,2634	-71,3731	0,75	1,33	675,31	0,32	3,15	1599,41	0,19	5,38	2731,70
RCOLM017	10,2837	-71,3406	1,49	0,67	340,19	0,40	2,49	1264,30	0,14	7,03	3569,48
RCOLM016	10,3026	-71,3069	3,13	0,32	162,48	0,44	2,25	1142,44	0,14	6,96	3533,94
RCOLM040	10,3195	-71,2295	2,50	0,40	203,10	0,28	3,56	1807,59	0,13	7,55	3833,51
RCOLM041	10,3573	-71,1958	3,33	0,30	152,33	0,63	1,60	812,40	0,14	7,37	3742,12
RCOLM042	10,4132	-71,1845	2,78	0,36	182,79	0,52	1,94	985,04	0,19	5,27	2675,84
RCOLM038	10,4569	-71,1559	5,56	0,18	91,40	0,44	2,26	1147,52	0,14	6,96	3533,94
RCOLM037	10,5043	-71,1548	3,45	0,29	147,25	0,57	1,74	883,49	0,13	7,45	3782,74
RCOLM036	10,5383	-71,1862	3,45	0,29	147,25	0,42	2,40	1218,60	0,17	5,86	2975,42

Estación	4° Pico			5° Pico		
	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)
RCOLM018	0,09	11,13	5651,26	0,07	15,14	7687,34
RCOLM017	0,09	11,29	5732,50	0,06	16,81	8535,28
RCOLM016	0,09	11,36	5768,04	0,05	18,87	9581,24
RCOLM040	0,08	12,70	6448,43	0,06	16,40	8327,10
RCOLM041	0,08	12,64	6417,96	0,05	18,35	9317,21
RCOLM042	0,10	10,45	5305,99	0,06	15,59	7915,82
RCOLM038	0,08	12,51	6351,95	0,06	17,17	8718,07
RCOLM037	0,08	12,12	6153,93	0,07	14,31	7265,90
RCOLM036	0,08	11,95	6067,61	0,05	18,81	9550,78

PERFIL 3											
Estación	Coordenadas		1° Pico			2° Pico			3° Pico		
	Latitud	Longitud	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)
RCOLM020	10,1850	-71,3107	1,89	0,53	269,11	0,46	2,16	1096,74	0,22	4,51	2289,95
RCOLM021	10,2059	-71,2799	1,47	0,68	345,27	0,44	2,29	1162,75	0,16	6,43	3264,83
RCOLM022	10,2247	-71,2453	0,50	2,00	1015,50	0,29	3,47	1761,89	0,15	6,67	3386,69
RCOLM023	10,2451	-71,2109	1,37	0,73	370,66	0,46	2,17	1101,82	0,19	5,32	2701,23
RCOLM046	10,2578	-71,1591	1,96	0,51	258,95	0,29	3,39	1721,27	0,13	7,93	4026,46
RCOLM045	10,3127	-71,1291	1,35	0,74	375,74	0,52	1,91	969,80	0,16	6,35	3224,21
RCOLM044	10,3677	-71,1391	2,00	0,50	253,88	0,53	1,90	964,73	0,17	5,97	3031,27
RCOLM043	10,4123	-71,1218	4,00	0,25	126,94	0,51	1,97	1000,27	0,17	6,02	3056,66

Estación	4° Pico			5° Pico		
	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)
RCOLM020	0,09	11,22	5696,96	0,06	16,81	8535,28
RCOLM021	0,09	11,33	5752,81	0,05	18,95	9621,86
RCOLM022	0,08	11,96	6072,69	0,06	17,80	9037,95
RCOLM023	0,09	11,29	5732,50	0,06	16,38	8316,95
RCOLM046	0,08	13,28	6742,92	0,06	16,83	8545,43
RCOLM045	0,08	11,85	6016,84	0,07	15,04	7636,56
RCOLM044	0,08	12,54	6367,19	0,06	16,78	8520,05
RCOLM043	0,09	10,61	5387,23	0,07	15,29	7763,50

PERFIL 4											
Estación	Coordenadas		1° Pico			2° Pico			3° Pico		
	Latitud	Longitud	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)
RCOLM054	10,1358	-71,2631	1,72	0,58	294,50	0,41	2,42	1228,76	0,15	6,79	3447,62
RCOLM055	10,1571	-71,2208	0,68	1,48	751,47	0,25	3,99	2025,92	0,14	7,36	3737,04
RCOLM056	10,1863	-71,1939	1,89	0,53	269,11	0,45	2,24	1137,36	0,13	7,52	3818,28
RCOLM058	10,1812	-71,1385	2,86	0,35	177,71	0,51	1,97	1000,27	0,15	6,80	3452,70
RCOLM059	10,1598	-71,0870	3,23	0,31	157,40	0,49	2,06	1045,97	0,12	8,62	4376,81
RCOLM060	10,1208	-71,0407	2,70	0,37	187,87	0,45	2,24	1137,36	0,13	7,52	3818,28

Estación	4° Pico			5° Pico		
	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)
RCOLM054	0,07	13,36	6783,54	0,06	16,50	8377,88
RCOLM055	0,07	14,12	7169,43	0,06	17,68	8977,02
RCOLM056	0,07	14,60	7413,15	0,05	20,00	10155,00
RCOLM058	0,09	11,53	5854,36	0,05	18,93	9611,71
RCOLM059	0,08	11,86	6021,92	0,06	15,76	8002,14
RCOLM060	0,07	13,39	6798,77	0,06	15,87	8057,99

PERFIL 5											
Estación	Coordenadas		1° Pico			2° Pico			3° Pico		
	Latitud	Longitud	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)
RCOLM014	10,3344	-71,4135	0,98	1,02	517,91	0,39	2,55	1294,76	0,14	7,37	3742,12
RCOLM013	10,2913	-71,3923	1,54	0,65	330,04	0,36	2,81	1426,78	0,18	5,69	2889,10
RCOLM018	10,2634	-71,3731	0,75	1,33	675,31	0,32	3,15	1599,41	0,19	5,38	2731,70
RCOLM020	10,1850	-71,3107	1,89	0,53	269,11	0,46	2,16	1096,74	0,22	4,51	2289,95
RCOLM054	10,1358	-71,2631	1,72	0,58	294,50	0,41	2,42	1228,76	0,15	6,79	3447,62

Estación	4° Pico			5° Pico		
	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)
RCOLM014	0,08	13,05	6626,14	0,06	16,44	8347,41
RCOLM013	0,08	12,14	6164,09	0,06	16,01	8129,08
RCOLM018	0,09	11,13	5651,26	0,07	15,14	7687,34
RCOLM020	0,09	11,22	5696,96	0,06	16,81	8535,28
RCOLM054	0,07	13,36	6783,54	0,06	16,50	8377,88

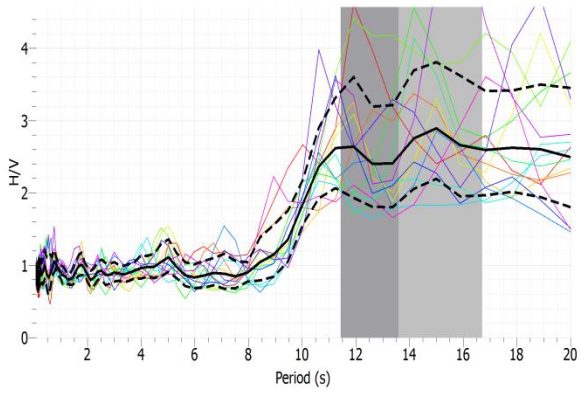
PERFIL 6											
Estación	Coordenadas		1° Pico			2° Pico			3° Pico		
	Latitud	Longitud	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)
RCOLM058	10,1812	-71,1385	2,86	0,35	177,71	0,51	1,97	1000,27	0,15	6,80	3452,70
RCOLM057	10,2142	-71,1779	3,33	0,30	152,33	0,36	2,75	1396,31	0,14	7,07	3589,79
RCOLM023	10,2451	-71,2109	1,37	0,73	370,66	0,46	2,17	1101,82	0,19	5,32	2701,23
RCOLM040	10,3195	-71,2295	2,50	0,40	203,10	0,28	3,56	1807,59	0,13	7,55	3833,51
RCOLM010	10,3882	-71,3356	1,49	0,67	340,19	0,39	2,54	1289,69	0,16	6,39	3244,52

Estación	4° Pico			5° Pico		
	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)	Frecuencia (s)	Período (s)	Profundidad (m)
RCOLM058	0,09	11,53	5854,36	0,05	18,93	9611,71
RCOLM057	0,08	13,28	6742,92	0,06	17,85	9063,34
RCOLM023	0,09	11,29	5732,50	0,06	16,38	8316,95
RCOLM040	0,08	12,70	6448,43	0,06	16,40	8327,10
RCOLM010	0,08	11,84	6011,76	0,06	16,81	8535,28

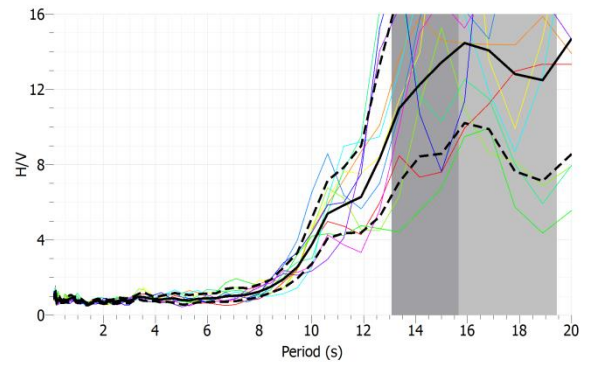
## **APÉNDICE B**

Gráficos de periodo vs amplitud H/V correspondiente a cada estación.

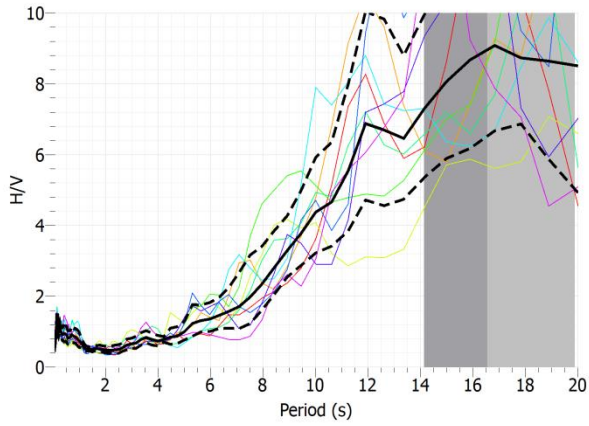
RCOLM06



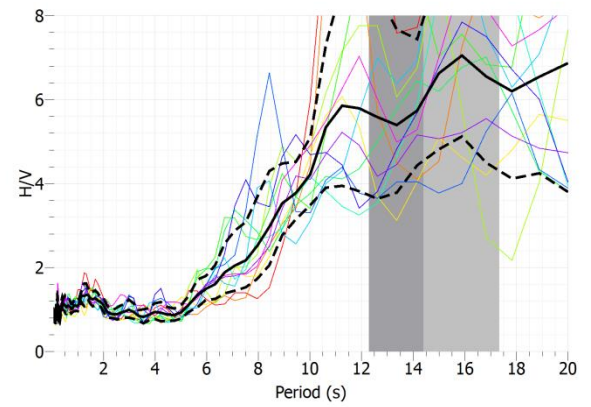
RCOLM07



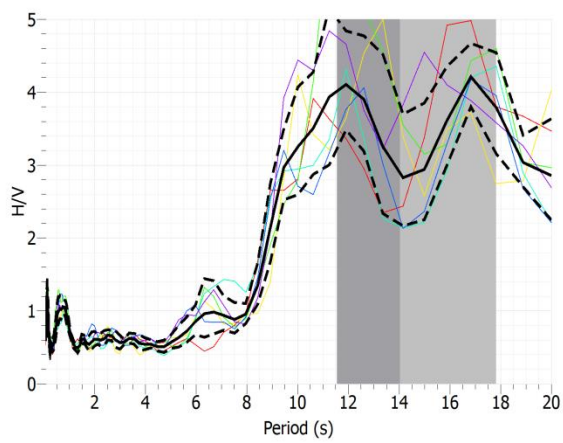
RCOLM08



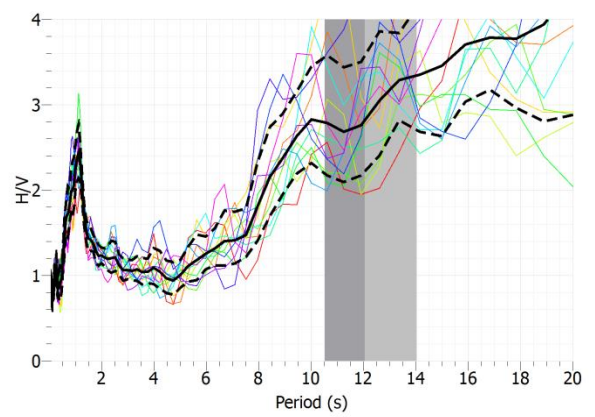
RCOLM09



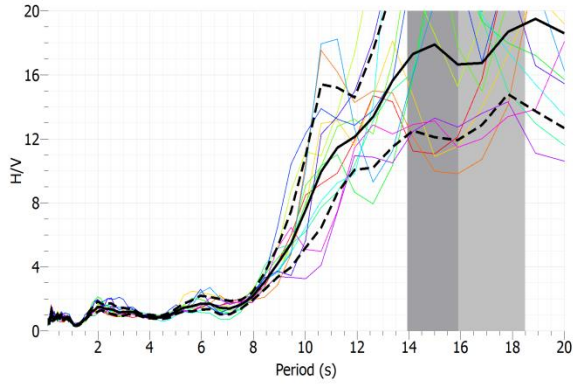
RCOLM10



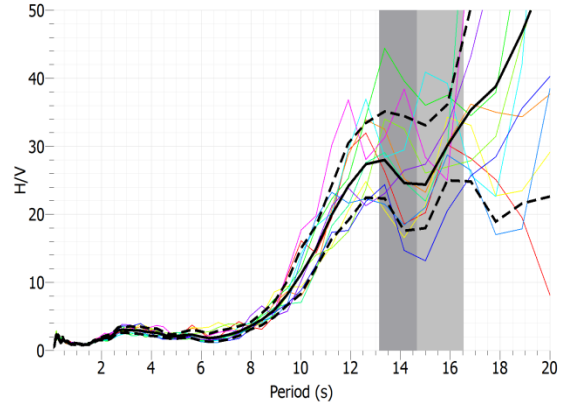
RCOLM11



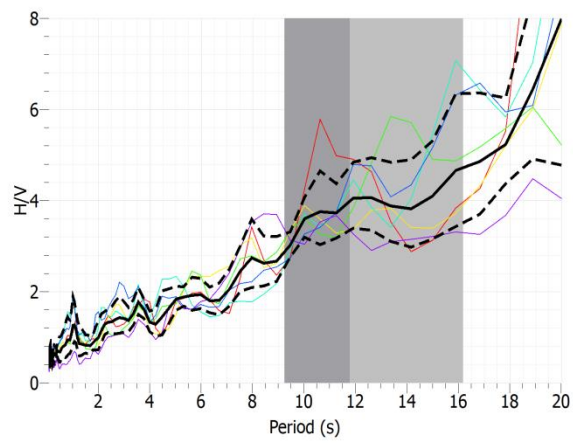
RCOLM12



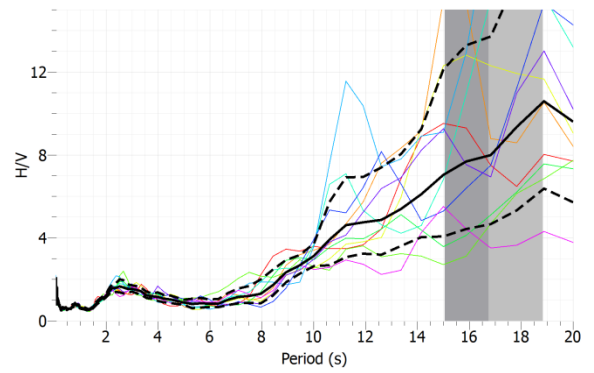
RCOLM13



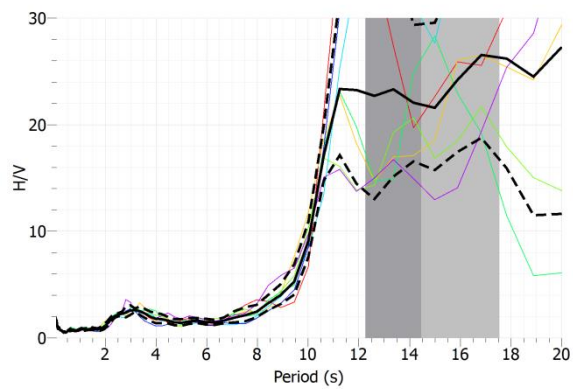
RCOLM14



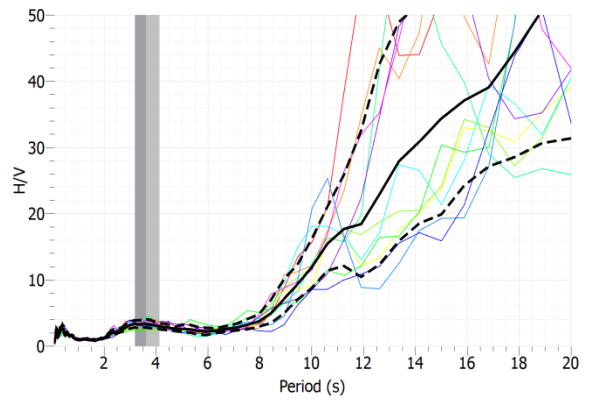
RCOLM16



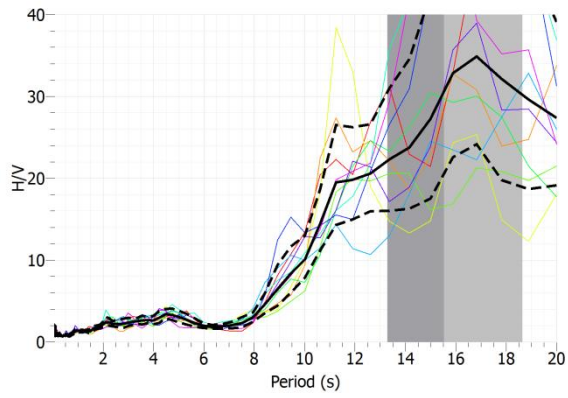
RCOLM17



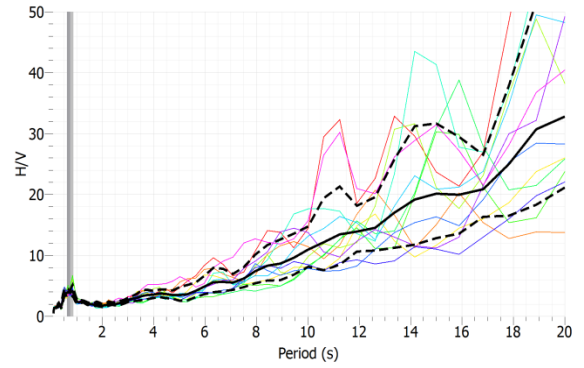
RCOLM18



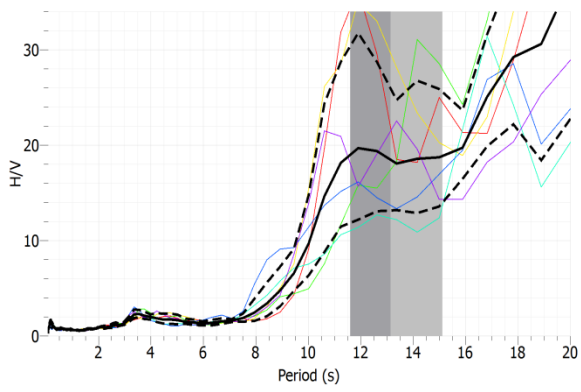
RCOLM20



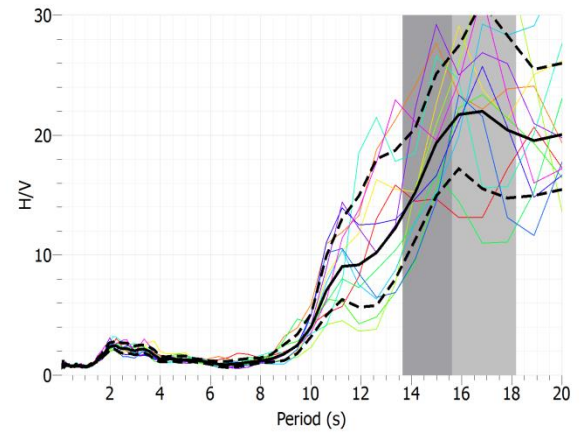
RCOLM21



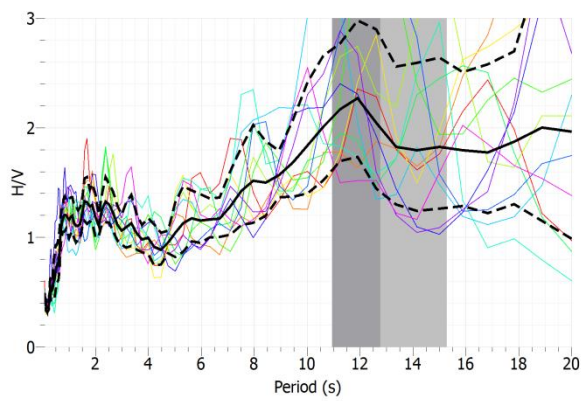
RCOLM22



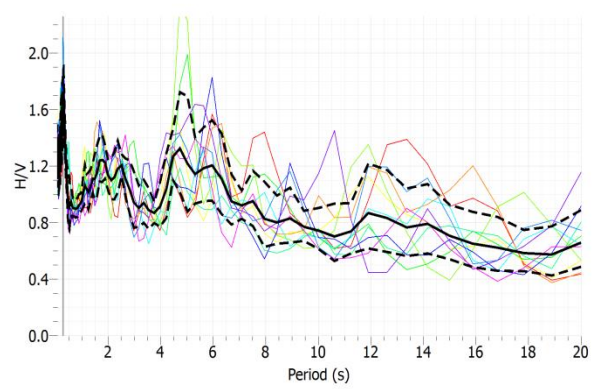
RCOLM23



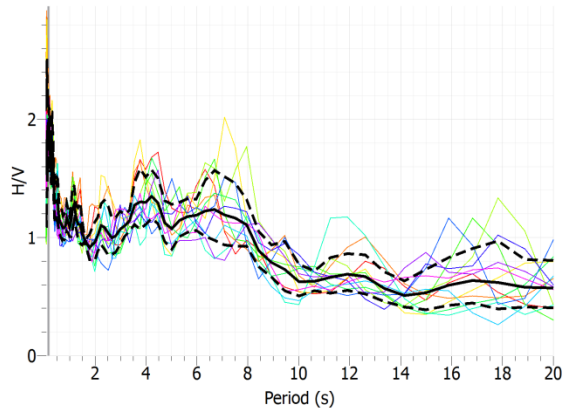
RCOLM36



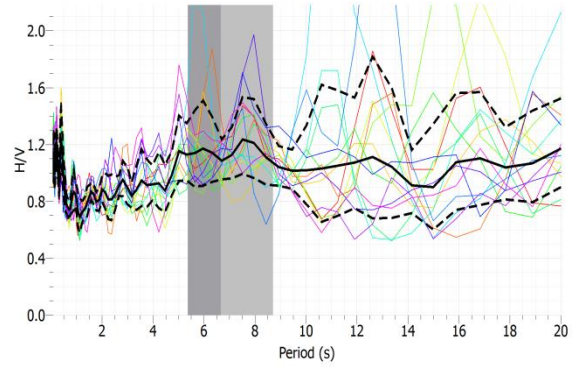
RCOLM37



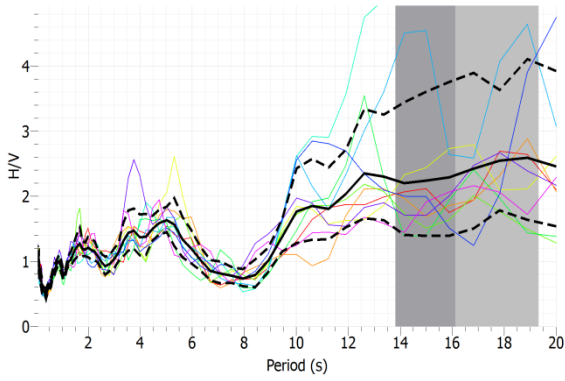
RCOLM38



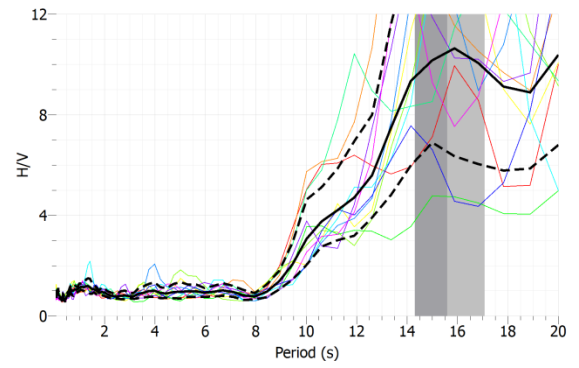
RCOLM40



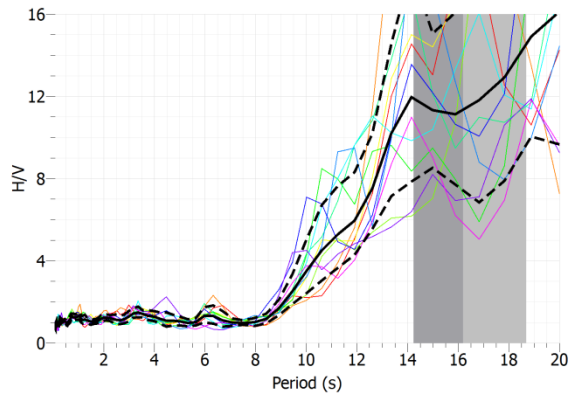
RCOLM41



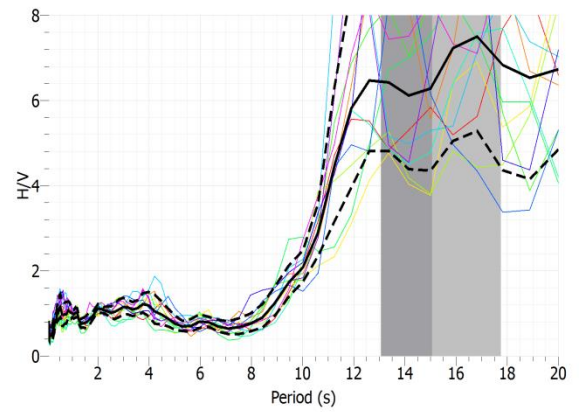
RCOLM42



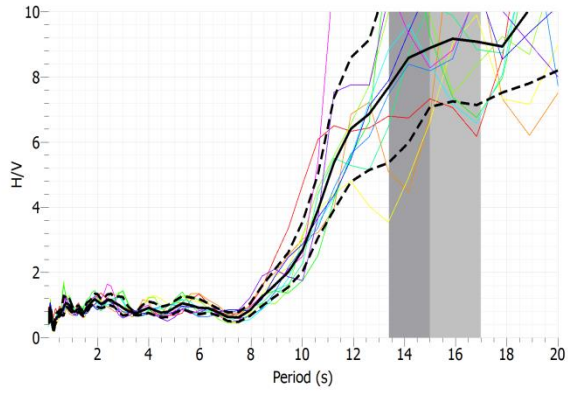
RCOLM43



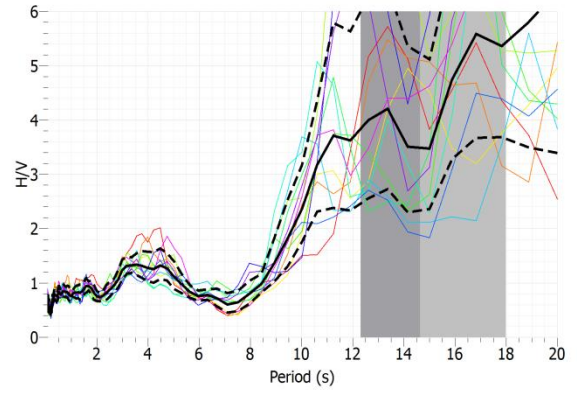
RCOLM44



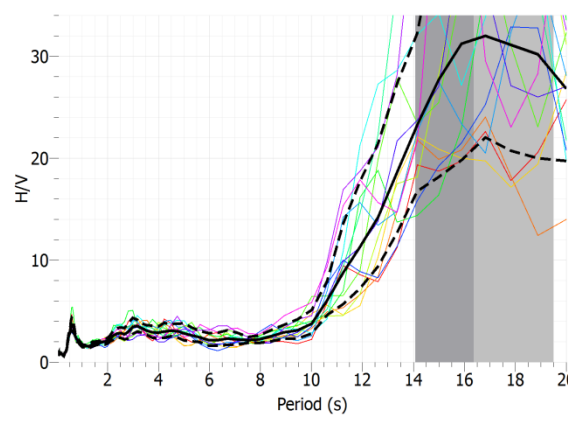
RCOLM45



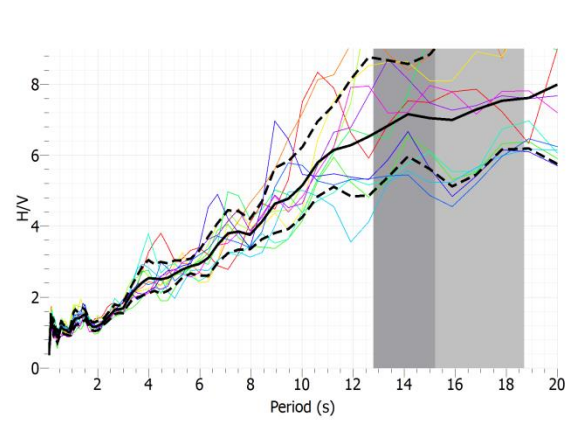
RCOLM46



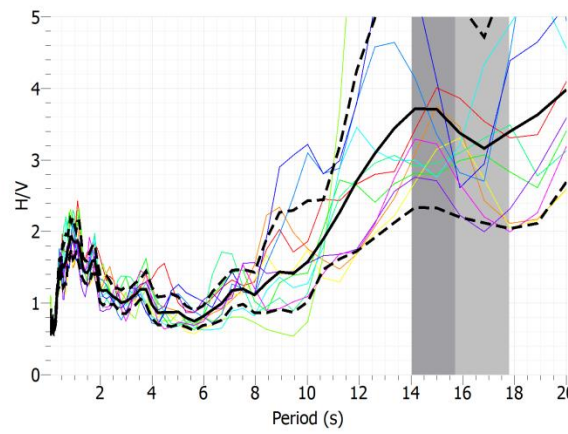
RCOLM54



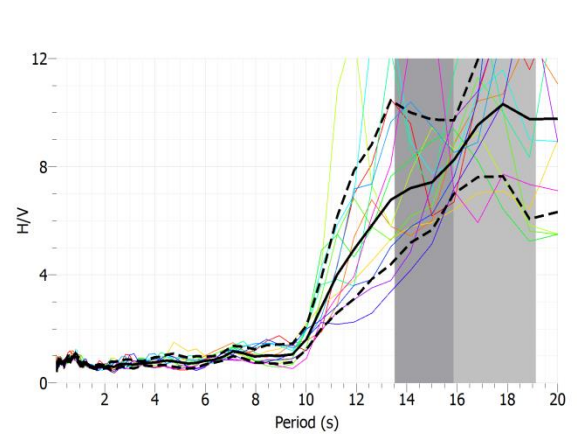
RCOLM55



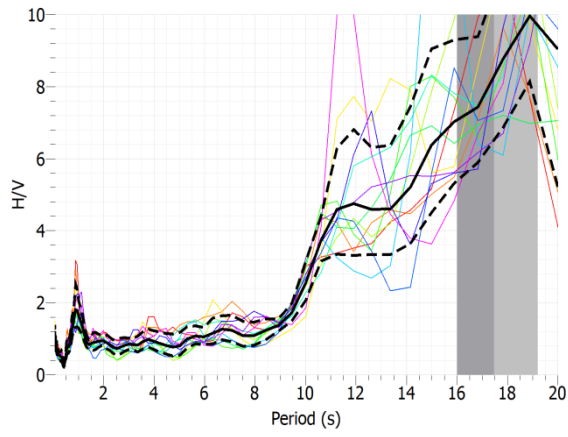
RCOLM56



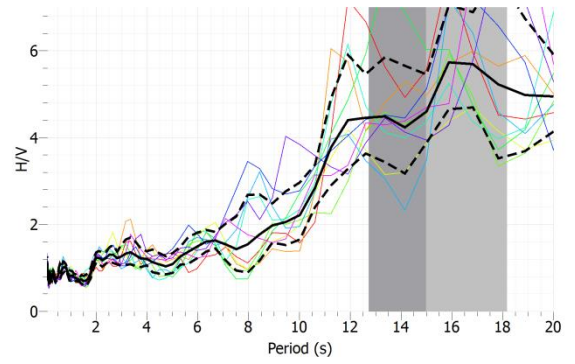
RCOLM57



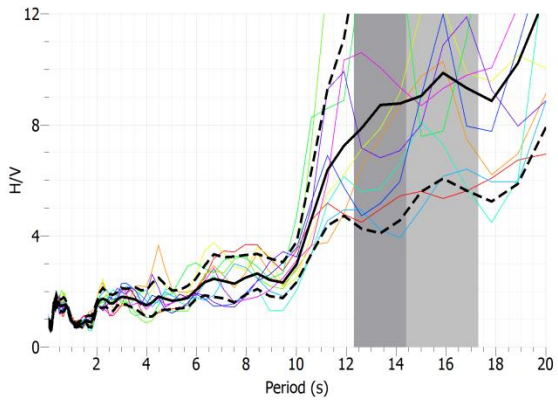
RCOLM58



RCOLM59



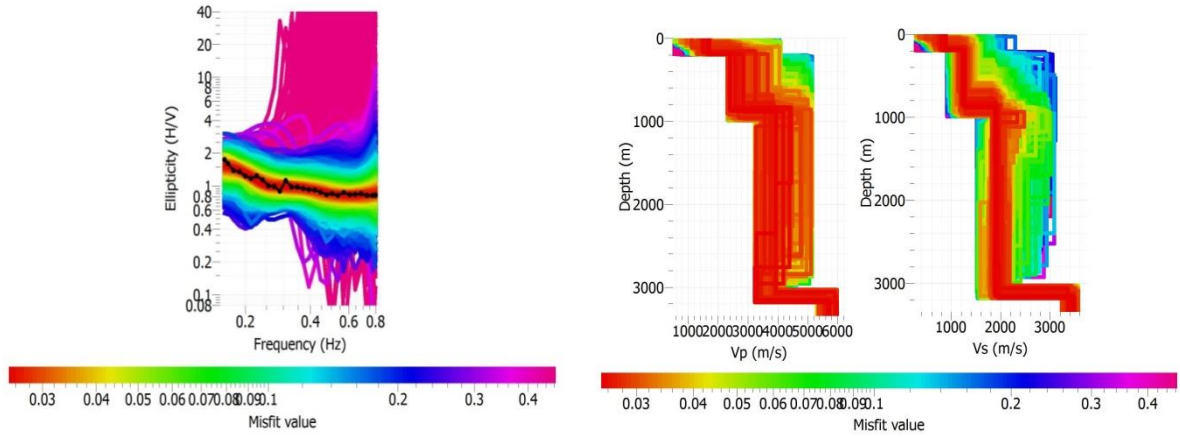
RCOLM60



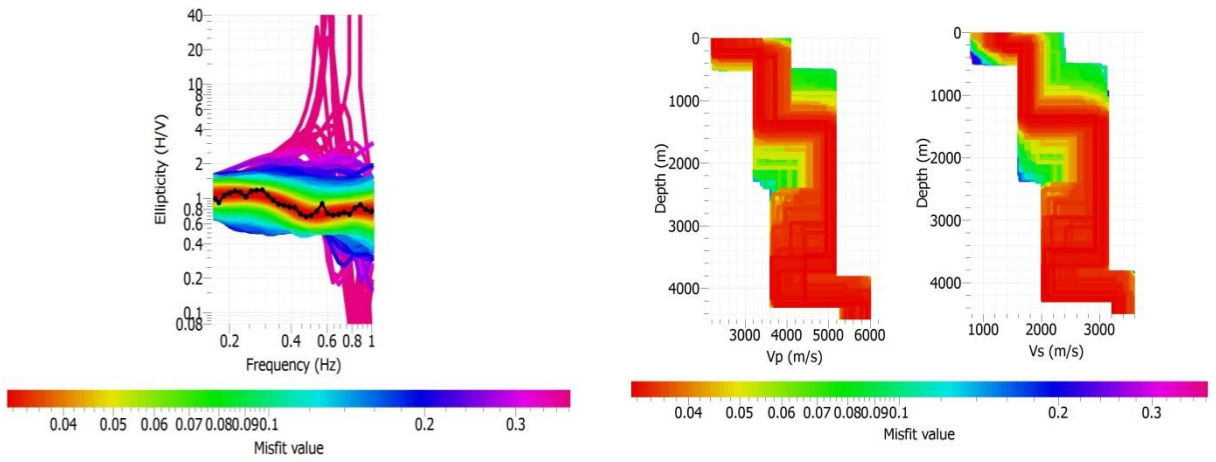
## **APÉNDICE C**

Gráficos de elipticidad y modelos 1D correspondiente a cada estación.

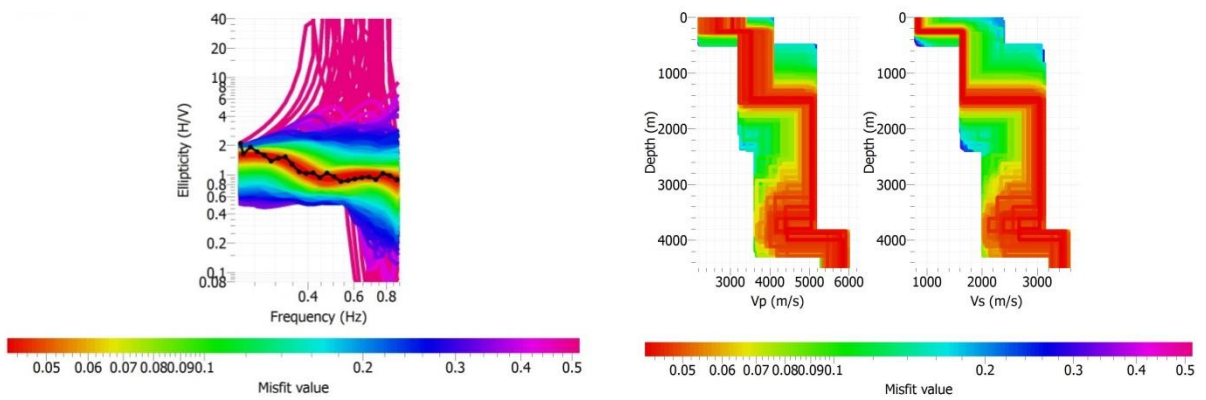
### RCOLM06



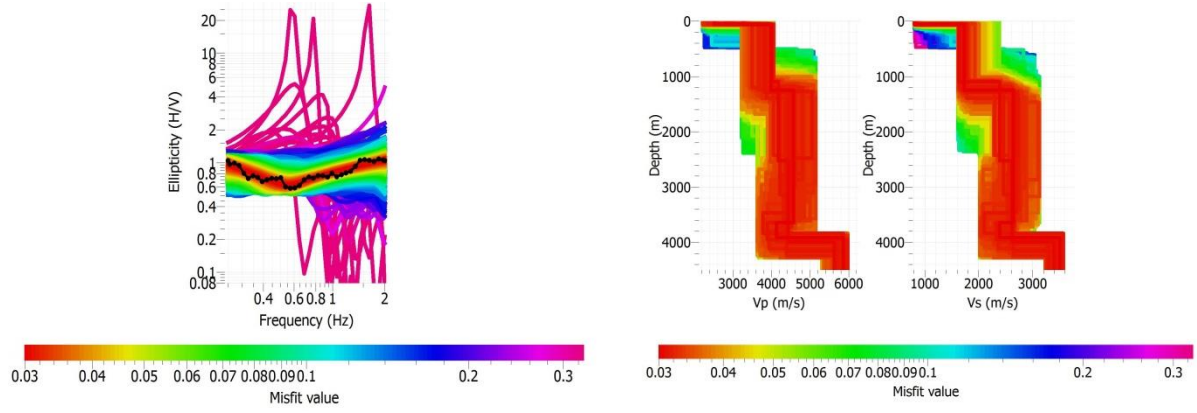
### RCOLM07



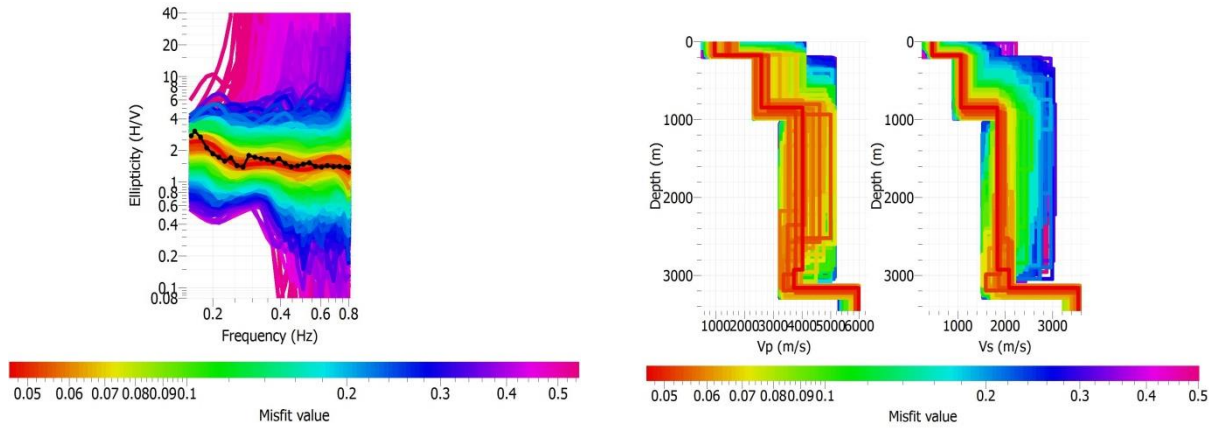
### RCOLM08



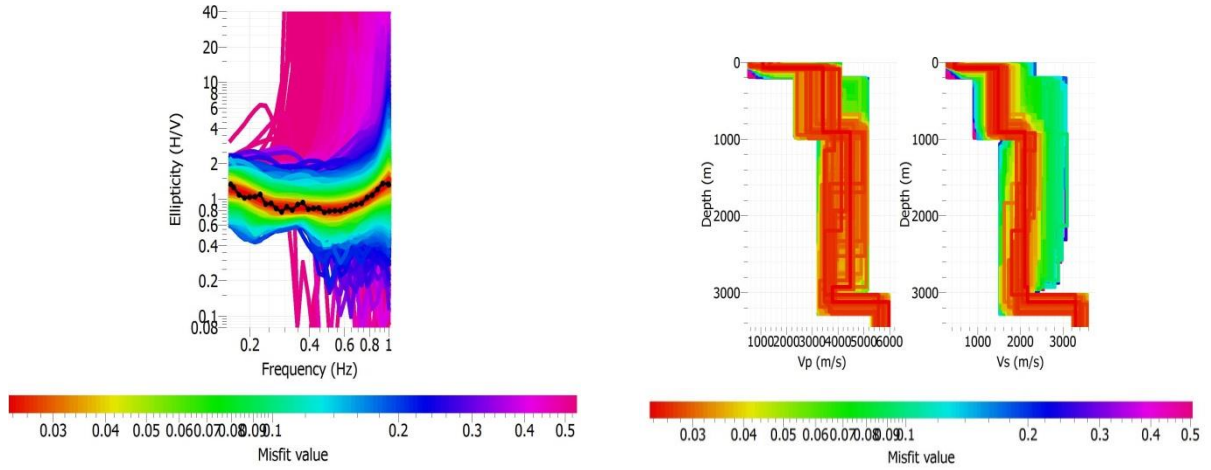
### RCOLM09



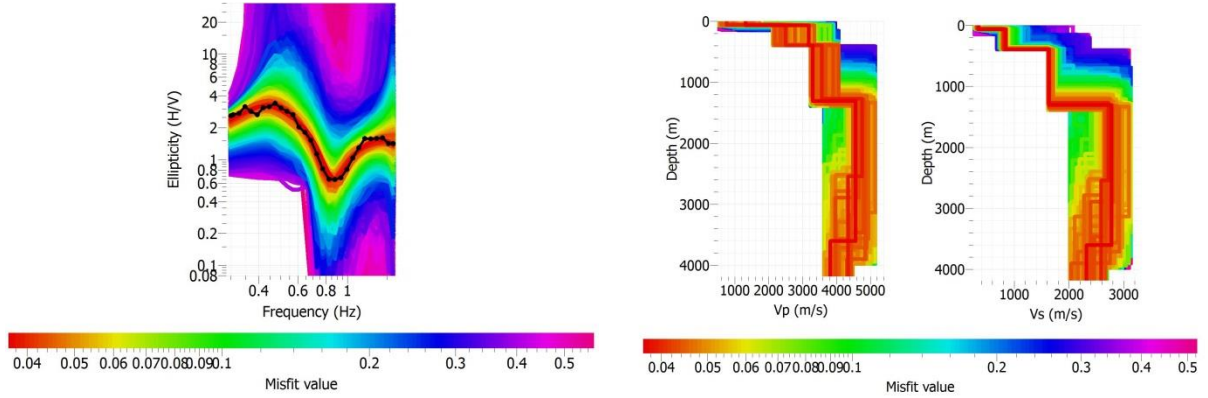
### RCOLM10



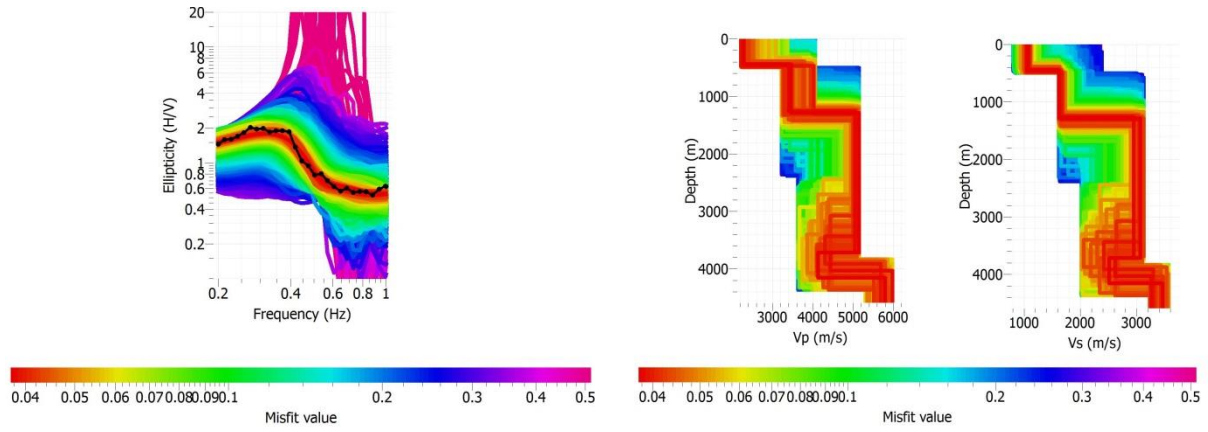
### RCOLM11



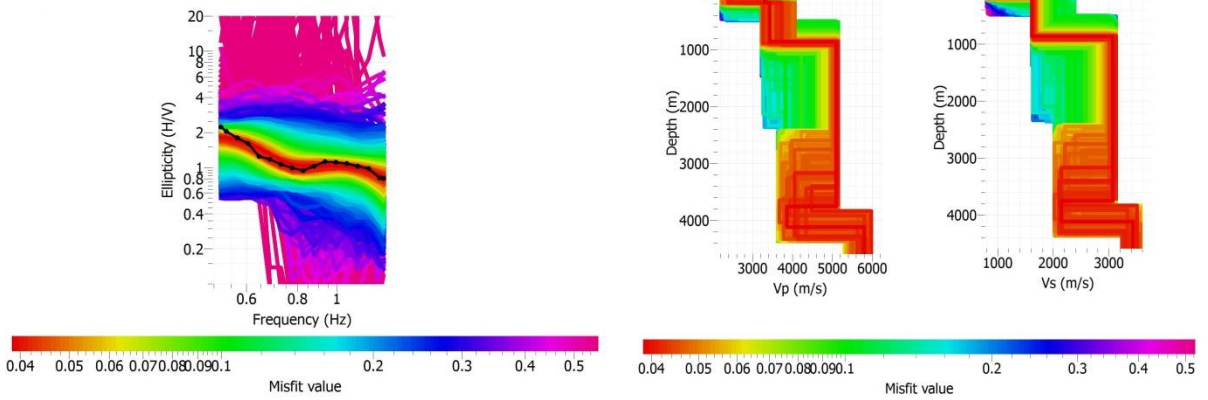
### RCOLM12



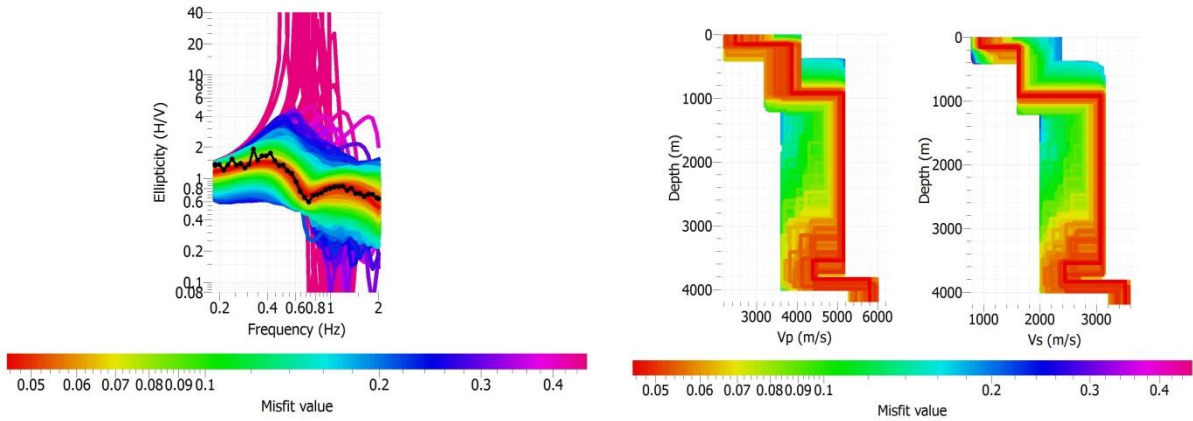
### RCOLM13



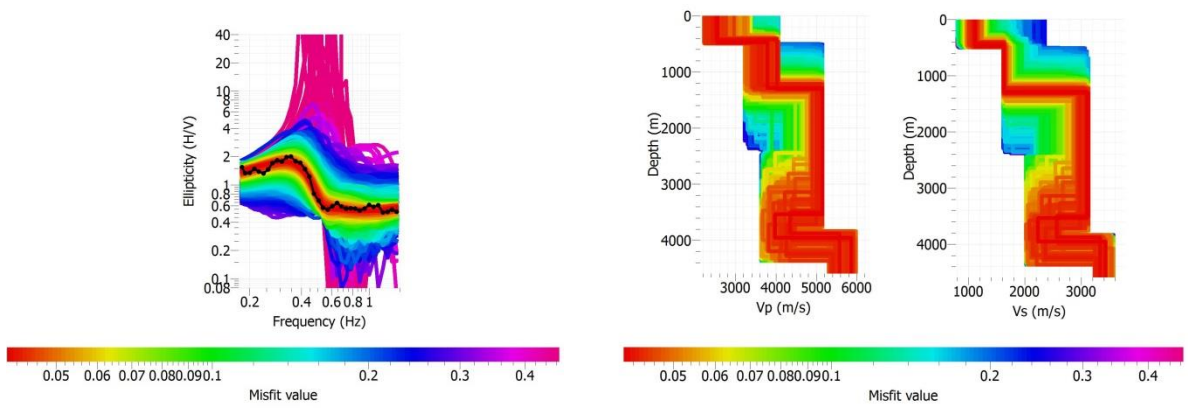
### RCOLM14



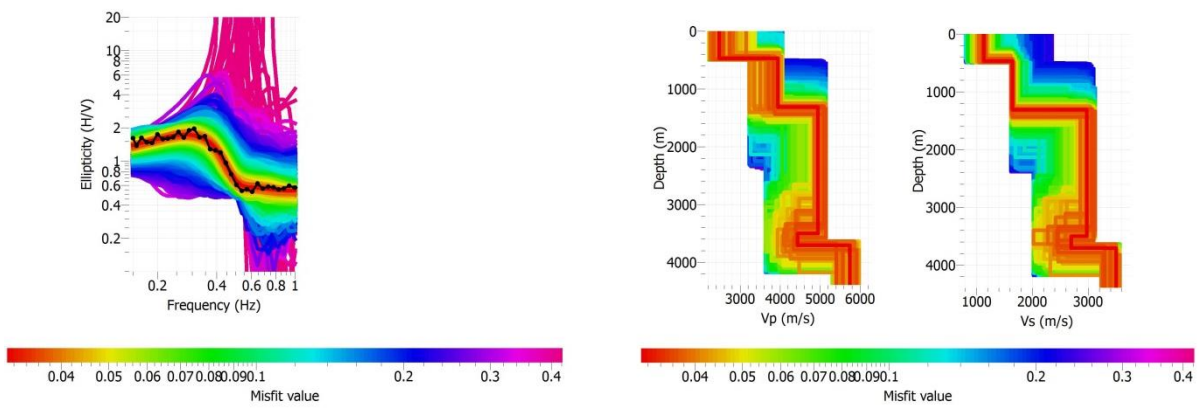
### RCOLM16



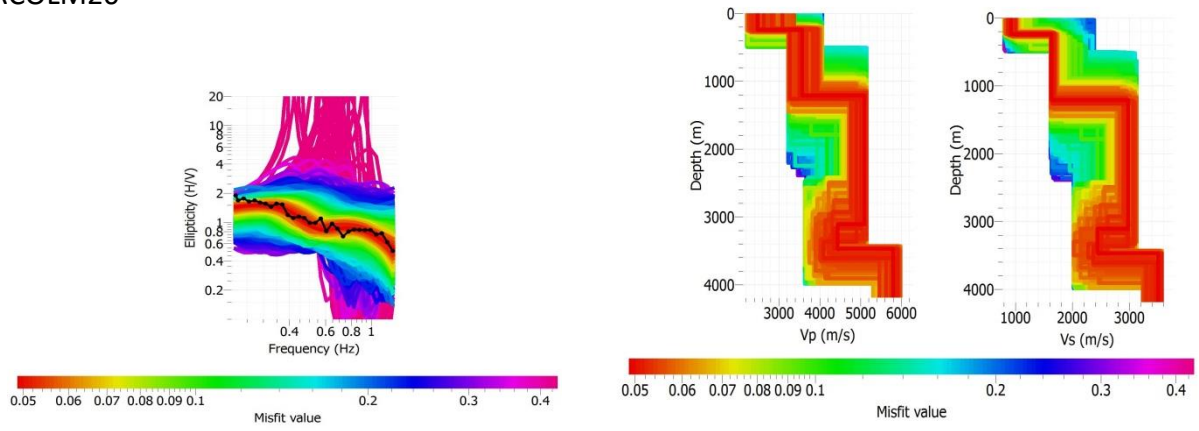
### RCOLM17



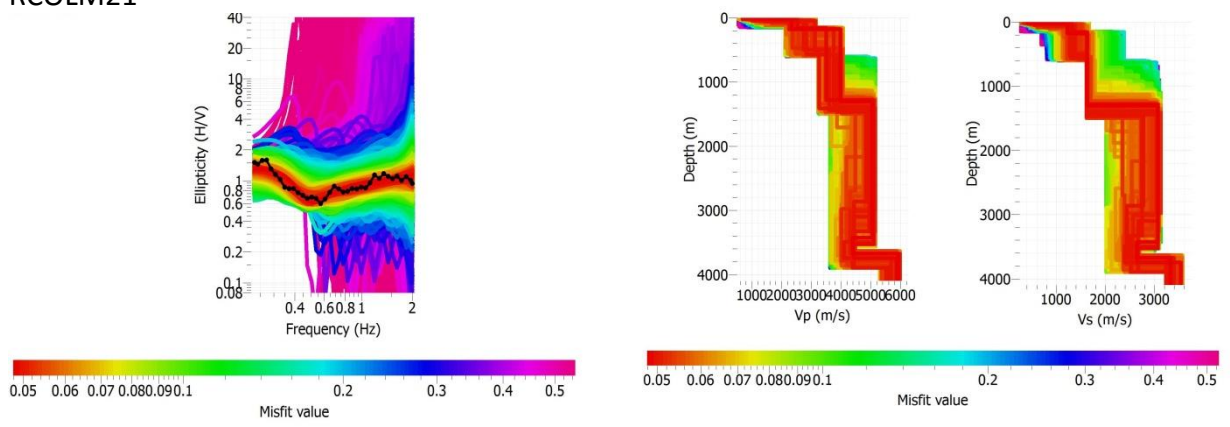
### RCOLM18



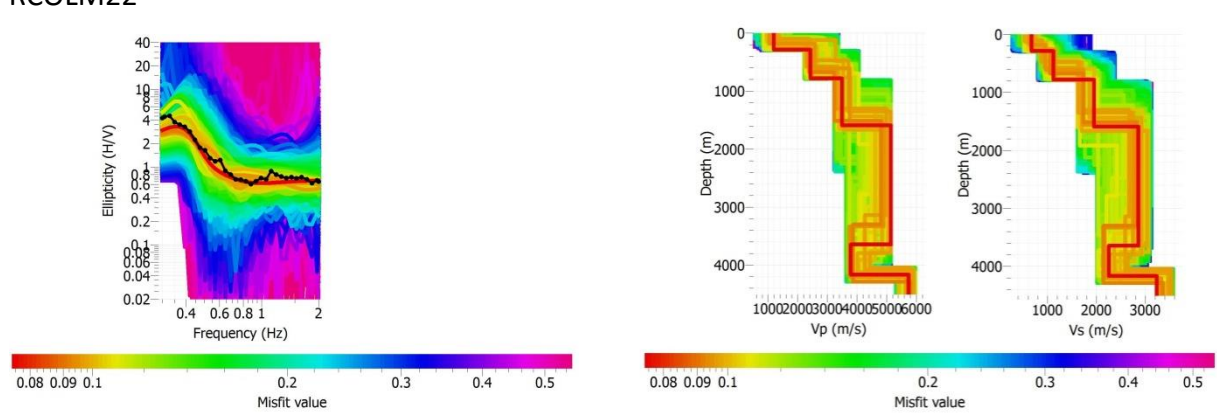
### RCOLM20



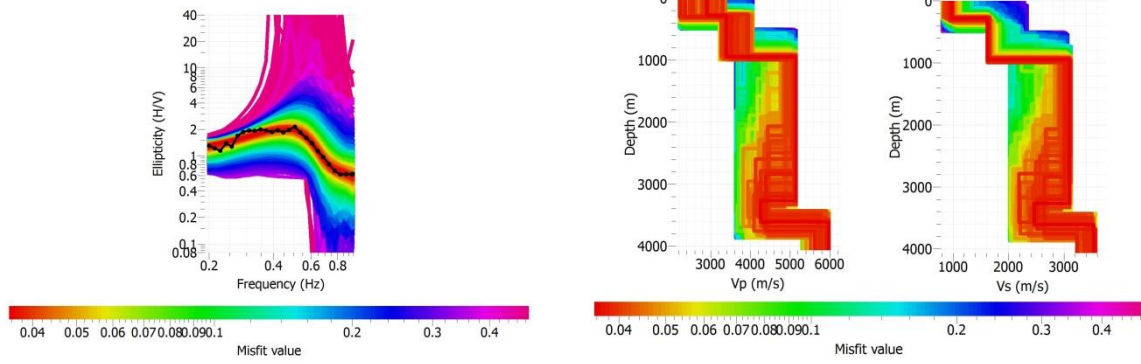
### RCOLM21



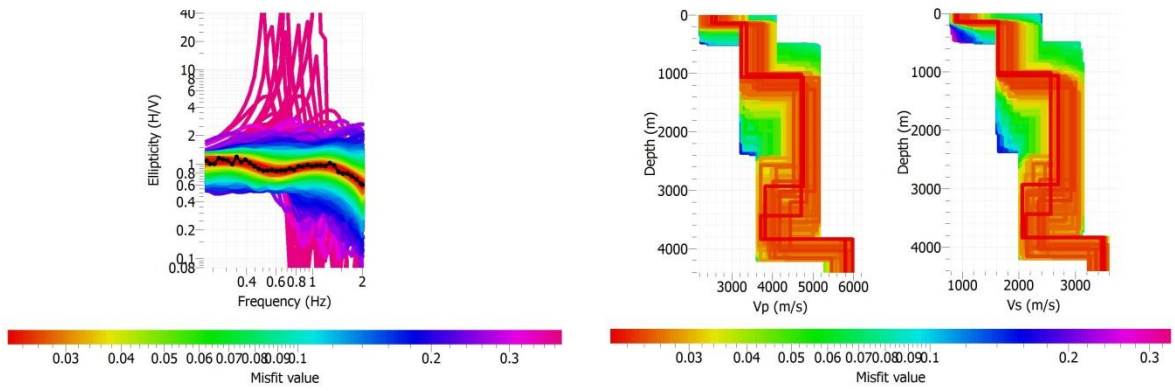
### RCOLM22



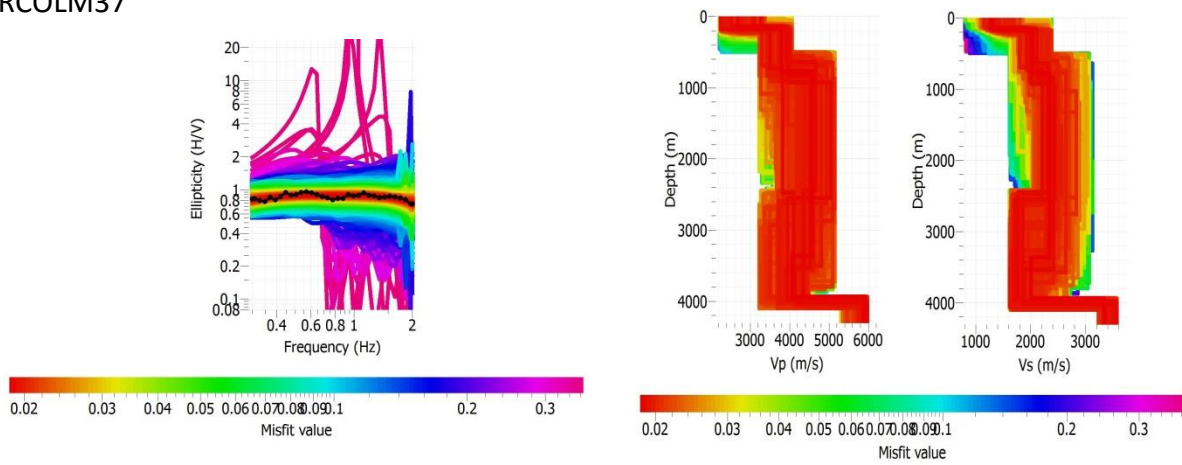
### RCOLM23



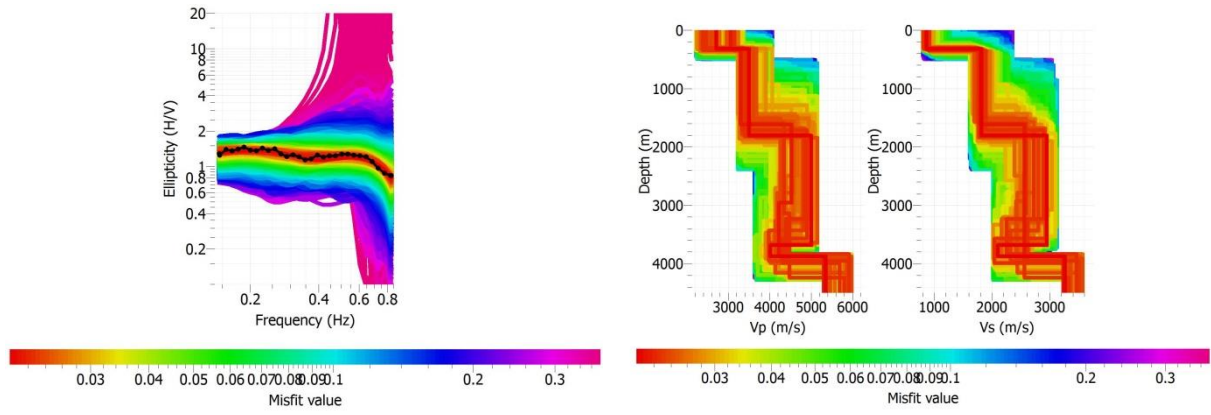
### RCOLM36



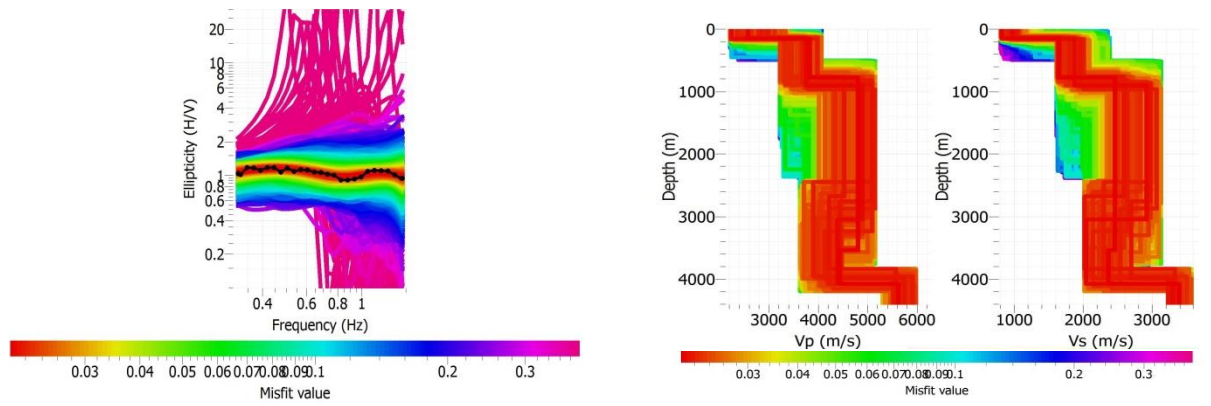
### RCOLM37



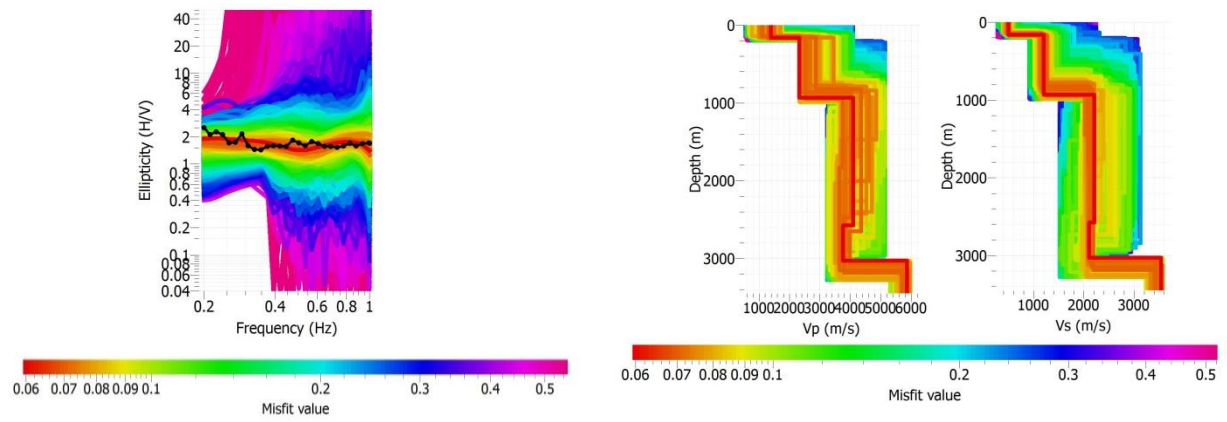
### RCOLM40



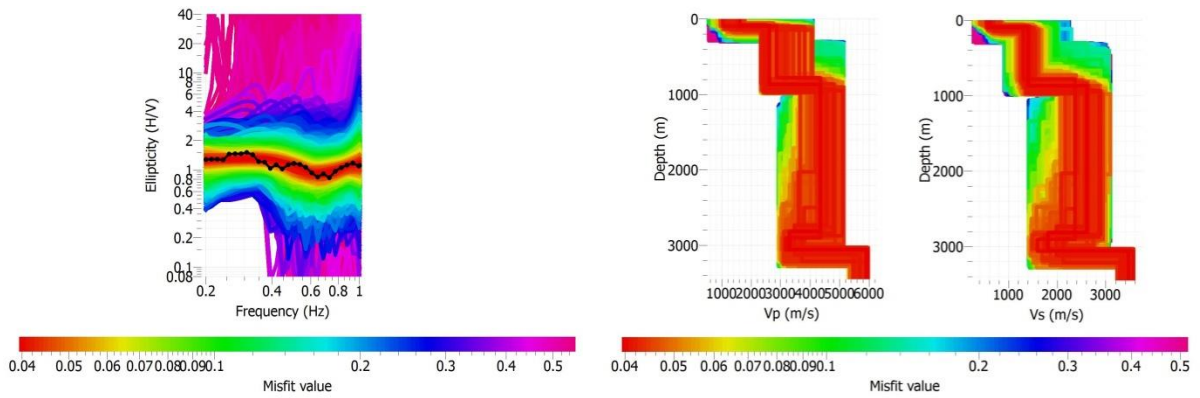
### RCOLM41



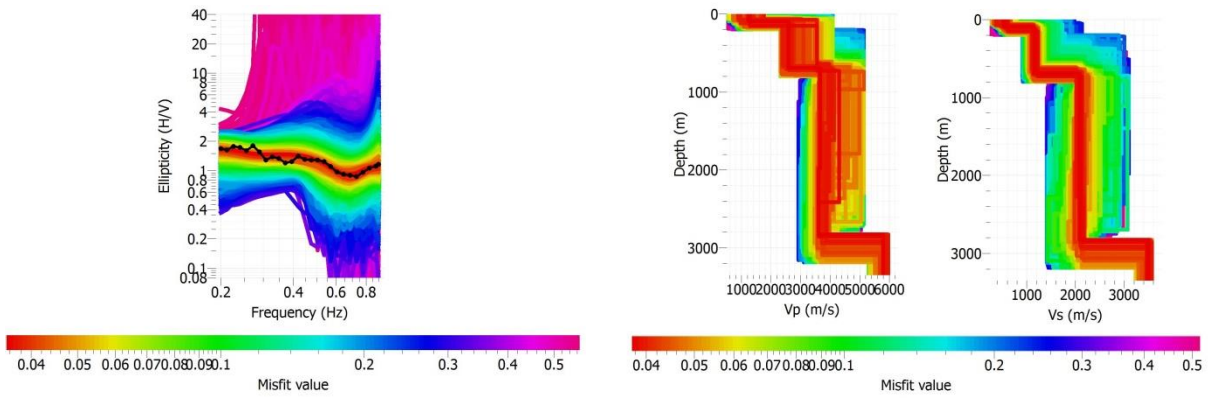
### RCOLM42



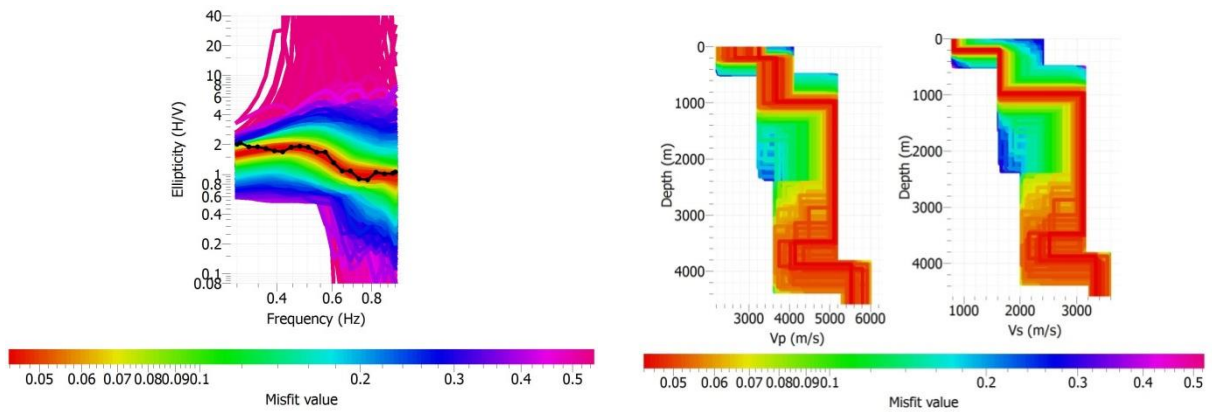
### RCOLM43



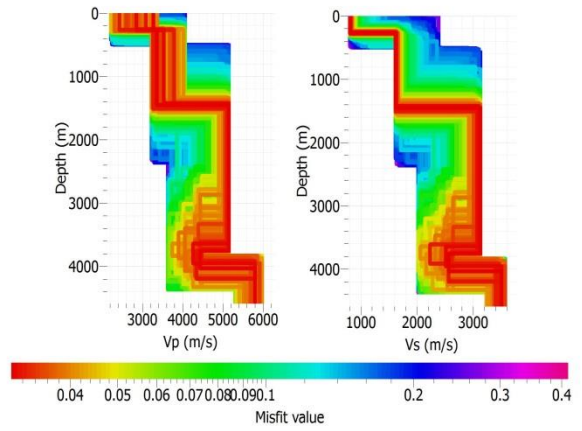
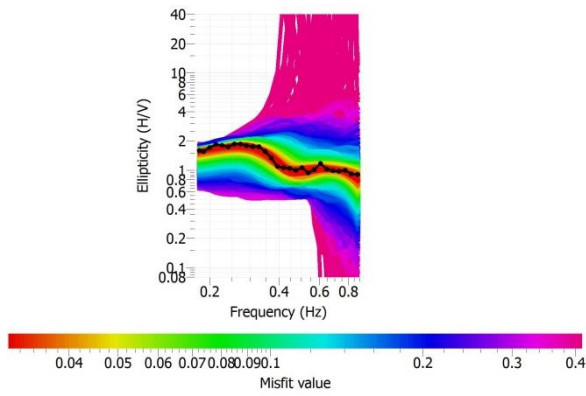
### RCOLM44



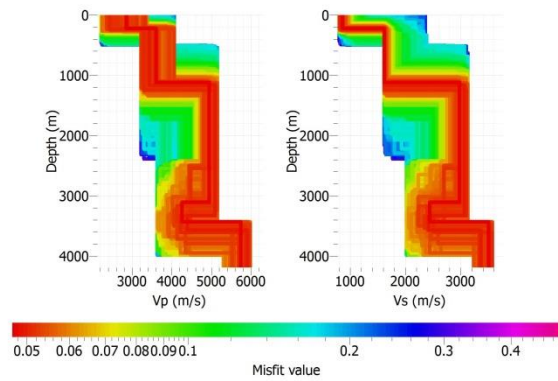
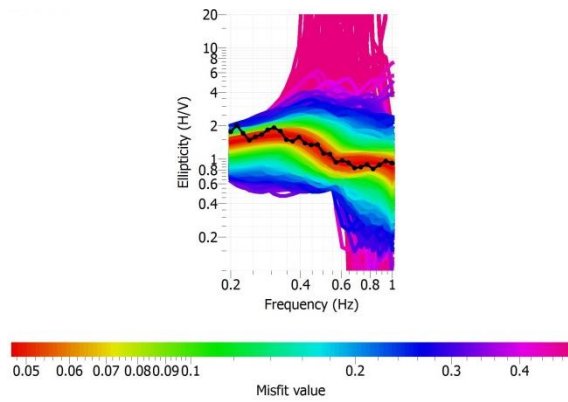
### RCOLM45



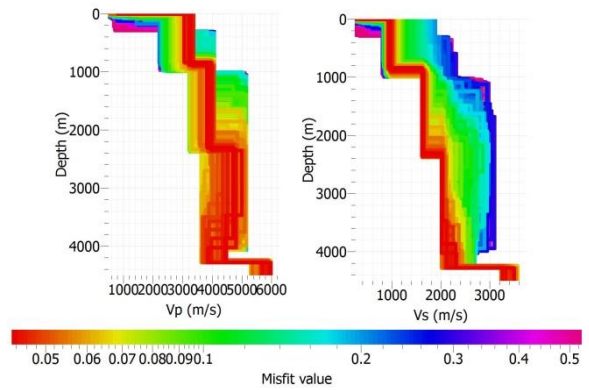
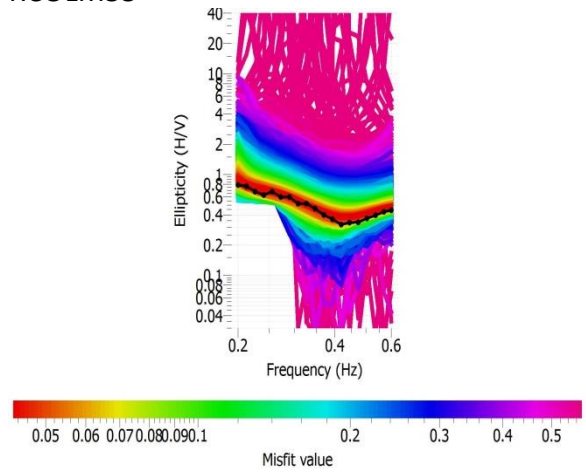
### RCOLM46



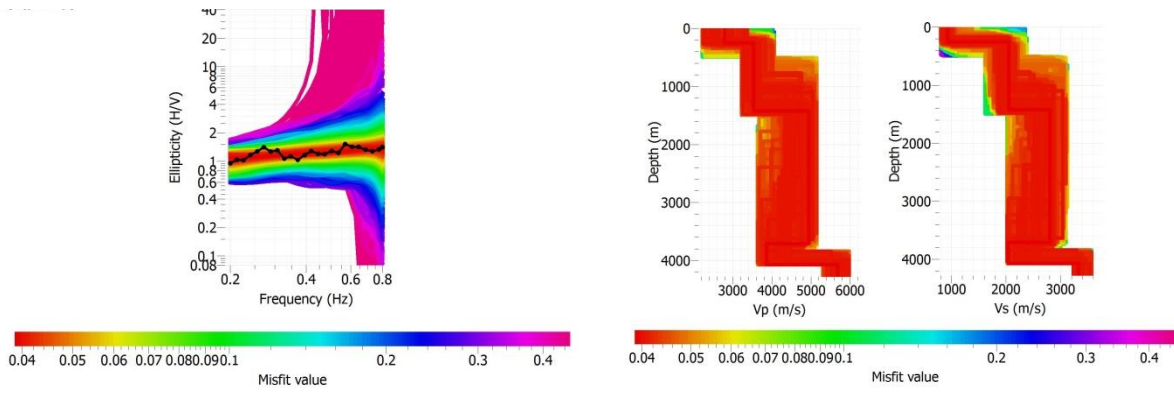
### RCOLM54



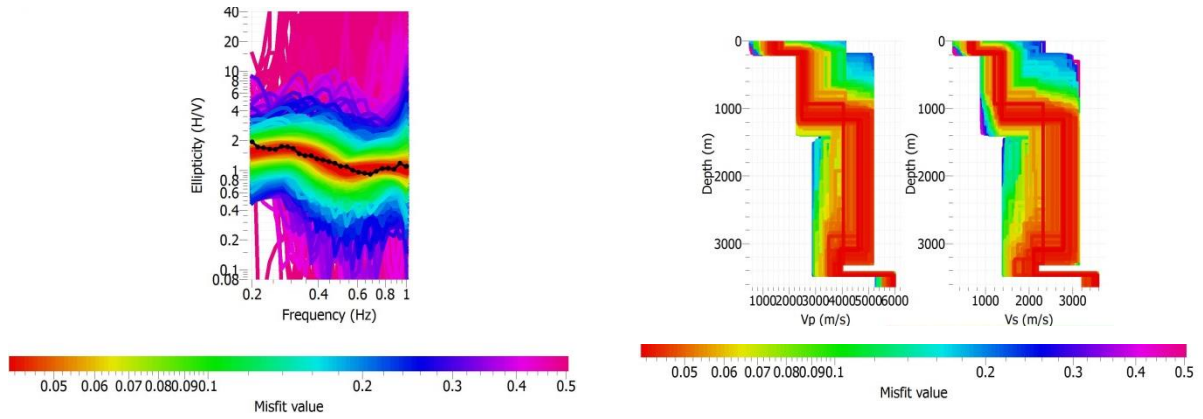
### RCOLM55



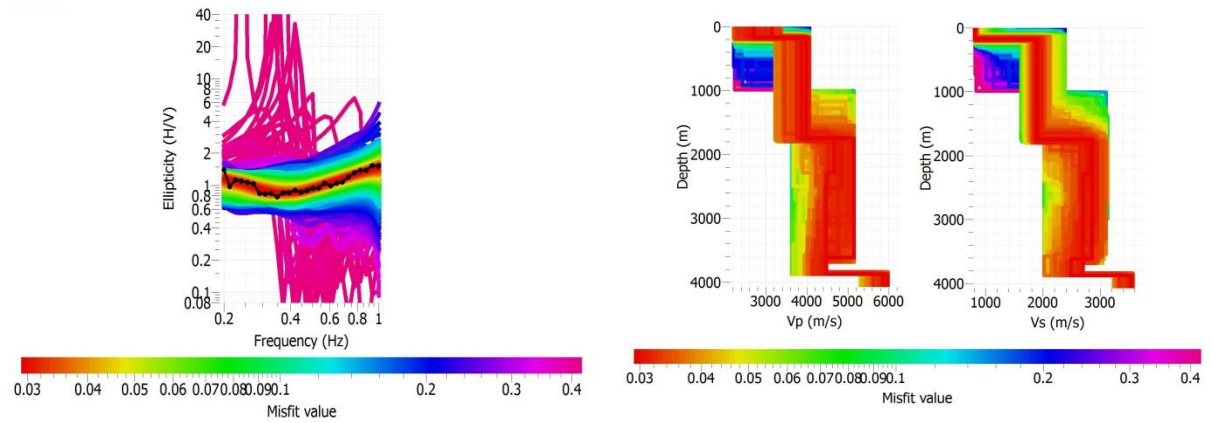
### RCOLM56



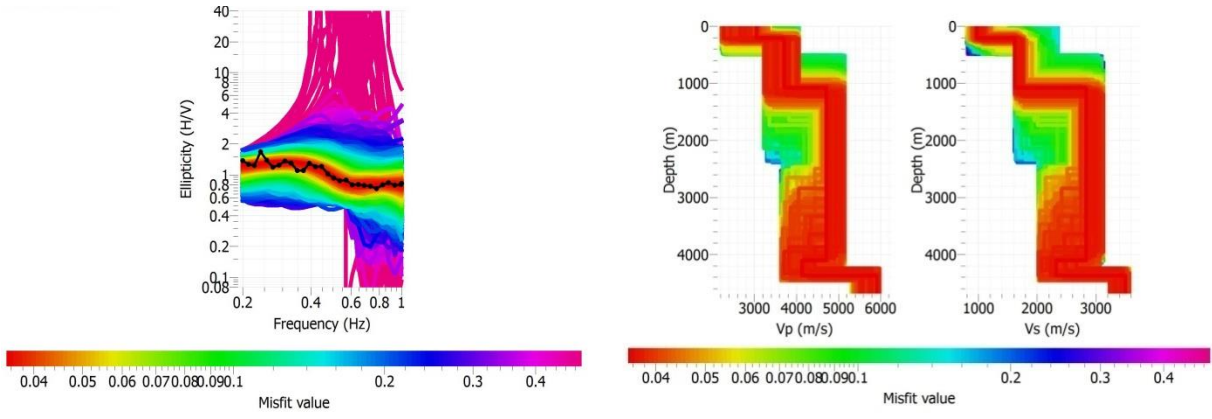
### RCOLM57



### RCOLM58



### RCOLM59



### RCOLM60

