

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Caracterización geofísica del área suroeste de la cuenca Barinas – Apure a partir de la aplicación del método de Nakamura

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Bra. Laura C. Laguado G.
Para optar al título de
Ingeniera Geofísica

Caracas, 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Caracterización geofísica del área suroeste de la cuenca Barinas – Apure a partir de la aplicación del método de Nakamura

Tutor Académico: Prof. Jesús González

Tutor industrial: Ing. Luis Yegres

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por la Bra. Laura C. Laguado G.

Para optar al título de

Ingeniera Geofísica

Caracas, 2015

Caracas, 28 de octubre de 2015

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bra. **Laura Carolina Laguado Granado**, titulado:

**Caracterización geofísica del área suroeste de la cuenca Barinas-Apure
mediante la aplicación del método de Nakamura**

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**.


Prof. José Cavada
Jurado


Profa. Rosa Jimenez
Jurado


Prof. Jesús González
(Tutor académico)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios, por ser mi guía en cada paso que doy, por mantener mi fe intacta aún cuando la adversidad agobia, por darme la fuerza para luchar, y la valentía para intentar; por mantenerme de pie y regalarme cada minuto una nueva oportunidad, una familia tan hermosa y grandes amigos.

A mis padres Aixa de los Ángeles y Fernando Jesús quienes han apoyado cada uno de mis pasos, han sido mi inspiración y mis ganas de seguir adelante, gracias por cada consejo, cada palabra de aliento, por cada regaño y tanta preocupación, porque me enseñaron que el cielo es el límite, me encaminaron a ser una persona de fe, a valorar a la familia, y a luchar sin descanso por cumplir mis metas, a nunca decir que no, a creer en lo que puedo hacer e intentarlo siempre aunque parezca complicado, sin duda, no podía tener mejores, muchas gracias a ambos, los amo. A mis hermanos, China y Fer, ser hermana mayor no es fácil, pero si pudiese escoger a mis hermanos, créanme, los seguiría eligiendo a ustedes, no los cambio por nada, con sus ataques, sus locuras y sus tan complicadas personalidades, me han hecho una hermana muy afortunada, los adoro.

A mis abuelos María Antonia y Victor, por sus consejos y su disposición de ayudar y de consentirme, sus palabras son sabias y las han utilizado en el momento correcto, ustedes me han hecho una persona de bien, y tu Ana Luisa hermosa, ángel de mi vida, lamento que no puedas estar consciente de este enorme peldaño que he logrado subir, pero de todos modos, te lo dedico, porque en la salud fuiste una de las personas más importantes de mi niñez, mucho del camino que me trajo hasta acá, lo tracé a tu lado, y eso no lo olvidaré jamás.

A mis tios Luisfer, Lisette, Leticia y Aracelis, gracias por estar siempre, por ser esa parte que se suma a la felicidad de tener con quien compartir tus logros, por estar siempre allí, por el cariño y el apoyo. A mis primos Gaby, Daniel, Claudia, Ysamar, Ricardo, Luis

Daniel, Rosana, porque sin duda con ustedes he vivido los momentos más divertidos de la vida, ustedes son la parte menos complicada de mis días, son mi desahogo y mis risas, cada uno tiene un espacio importante en mi corazón.

A ti, Rafa, mi amor, que has soportado con paciencia mis días más difíciles, que has hecho de mí una mejor persona, y que aun en la distancia has estado presente, escribiendo una hermosa historia, regalándome tus sonrisas, tu amor y tu compañía, gracias miles por estar allí por ser mi equilibrio y mi paz, por sostenerme cuando estoy a punto de caer y por hacerme parte de tus días, de tu presente y tu futuro, con todo y combo, porque junto a ti, mis gorditos, Anabellita y Sheldon han hecho mi vida un poco más feliz. Pronto estaremos juntos otra vez, muy pronto.

A mi querida UCV, por recibirme en su casa, abrirme las puertas de esta hermosa alma mater, por permitirme conocer gente maravillosa, dedicarme a hacer lo que más me gusta, representarte en el deporte, y por brindarme los más bonitos recuerdos de mi vida, la magia de tus pasillos, de tu gente, el arte en cada rincón y el haber podido luchar para intentar salvarte de esta difícil situación me hicieron madurar, crecer como persona y aprender a amarte, y a los grandes y especiales amigos que me regalaste, Titi, Nathy, Chiqui, Wilmer, Calvo, Maritza, William, Rosa, Liliana, mis amigos y amigas del fútbol, mis compañeros de MAI-19, quienes me acompañaron y apoyaron durante toda la carrera, gracias por cada momento, por cada vez que me tendieron su mano, son los mejores, se les quiere muchísimo.

A mis profesores del ciclo básico Jose Luis Quintero, Lebjulet Braganti, Marianela S., y a los profesores de la escuela de Geología, Minas y Geofísica, ayudarnos a ser mejores profesionales y personas completas, y brindarnos todo su conocimiento, en especial a los profesores José Cavada, Ricardo Ambrosio, Yaraixa Pérez, Ronny Meza, Antonio Ughi, Mariano Arnaiz, Ricardo Alezones. A mi tutor académico el profesor Jesús González, por brindarme sus conocimientos, guiarme y ayudarme en todo momento, por estar siempre dispuesto a colaborar y por ser tan amable conmigo, y a mi tutor industrial Luis Yegres, por

estar siempre allí, cada vez que lo necesite, siempre dispuesto a escuchar, y aun en lo difícil del día, sentarse unos minutos ayudarme.

A la Fundación Venezolana de Estudios Sismológicos (FUNVISIS) por su gran labor como institución y su eficiencia, en especial al profesor Michael Schmitz, por ser fuente inagotable de conocimientos, un ejemplo a seguir, y al resto de la gran familia FUNVISIS, mis nuevos pero no menos importantes amigos, quienes me apoyaron incondicionalmente e hicieron de esa oficina mi casa, así que no podía dejarlos a un lado, Alixon, Maryever, Yoana, María, Sofía, Briceida, Azalia, Juniev, Made, Gaby: mi compañera de traspasos, Keny y a todos quienes formaron parte de mis días, y me ayudaron a hacer mucho más fácil mi estadía. Gracias por su apoyo y por todo lo que hicieron por mí.

LAGUADO, G., Laura C.

Caracterización geofísica del área suroeste de la cuenca Barinas – Apure a partir de la aplicación del método de Nakamura

Tutor académico: Prof. Jesús González, Tutor industrial: Ing. Luis Yegres.

Trabajo especial de grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2015, 97 pág.

Palabras Claves: ruido sísmico, Nakamura, microtremores, período fundamental, espesor sedimentario, cuenca Barinas-Apure.

Resumen. En el marco del proyecto GIAME (Geociencia Integral de los Andes de Mérida) desarrollado y puesto en marcha desde 2012 por FUNVISIS, surge la iniciativa de caracterizar la cuenca Barinas-Apure, a partir de la aplicación de un método alternativo, que ha sido utilizado anteriormente para estudios a niveles más someros. Para ello, empleando el método de Nakamura (H/V) se pretende estimar el espesor sedimentario y definir su geometría partiendo del comportamiento de las ondas sísmicas superficiales al propagarse por el medio.

El objetivo de este trabajo consistió principalmente en estimar 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, y puntos de medición adicional a fin de evaluar la variación lateral de la misma.

El procesamiento fue realizado mediante el programa Geopsy, con el cual se obtuvo la relación espectral H/V respecto al período referido y se generaron gráficos con presencia en general de tres picos de cociente espectral, los cuales corresponden al contraste de impedancias entre capas. A partir de allí se realizaron mapas de isoperíodos y espesores asociados a cada pico, lo que permitió observar la variación lateral y geometría de la cuenca.

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivo general	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Localización del área de estudio	3
1.5 Antecedentes de la investigación	3
CAPÍTULO II	8
MARCO GEOLÓGICO	8
2.1 Evolución de la cuenca Barinas-Apure	9
2.2 Estructura de la cuenca Barinas-Apure	14
2.3 Marco estratigráfico	15
CAPÍTULO III	21
MARCO TEÓRICO.....	21
3.1 Ondas sísmicas	21
3.1.1 Ondas corpóreas.....	22
3.1.2 Ondas superficiales	22
3.2 Dispersión de ondas Rayleigh	23
3.3 Microtremores	24
3.4 Métodos pasivos	25
3.4.1 Método de Nakamura	26
3.5 Efecto de sitio	27
3.6 Estimación de espesores sedimentarios	28
CAPÍTULO IV	29
MARCO METODOLÓGICO	29
4.1 Metodología de adquisición	29
4.2 Metodología de procesamiento	34

CAPÍTULO V	48
RESULTADOS Y ANÁLISIS	48
5.1 Análisis estadístico	48
5.2 Relación entre los períodos y el cociente espectral H/V	55
5.3 Mapas de isoperíodos y espesores sedimentarios	65
CAPÍTULO VI	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÉNDICE A	83
APÉNDICE B	87

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	3
Figura 2. Principales cuencas petrolíferas de Venezuela.....	8
Figura 3. Mapa de distribución de terrenos autóctonos en el norte de Suramérica.....	9
Figura 4. Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el norte de Suramérica.....	10
Figura 5. Distribución de valles de extensión o grábenes (Jurásico) en Venezuela.....	11
Figura 6. Cuadro de correlación de unidades más importantes dentro del Cretácico Temprano en Venezuela.....	12
Figura 7. Distribución de facies sedimentarias que dominaron durante el Cenomaniense- Campaniense.....	12
Figura 8. Distribución de facies sedimentarias durante el Maastrichtiense	13
Figura 9. Mapa estructural en profundidad de la cuenca Barinas – Apure.....	14
Figura 10. Sección NO-SE de la cuenca Barinas-Apure.....	15
Figura 11. Correlación estratigráfica a partir del Cretácico Tardío.....	16
Figura 12. Sección estratigráfica regional.....	18
Figura 13. Sección estratigráfica de la formación Pagüey.....	20
Figura 14. Ondas P.....	21
Figura 15. Ondas S.....	22
Figura 16. Ondas Love.....	22
Figura 17. Ondas Rayleigh.....	23
Figura 18. Registrador sísmico REF TEK 130B	30
Figura 19. Sismómetro Observer modelo 151-30	31
Figura 20. GPS Garmin modelo 60CSx.....	32
Figura 21. Carpetas de datos originales extraídos de memorias externas del registrador.....	35
Figura 22. Hojas de textos relacionadas a estaciones y horas del día juliano 349.....	36
Figura 23. Rutina 1- Arcfetch, Labview	36

Figura 24. Rutina 2-Rtcvrt Labview.....	37
Figura 25. Rutina 3-MoveData, Labview	37
Figura 26. Rutina 4-Ref2Saf, Labview	38
Figura 27. Ventana para importar señal en Geopsy	39
Figura 28. Ventana <i>subtract value</i> en Geopsy	39
Figura 29. Ventana de filtros de señal en Geopsy	40
Figura 30. Control automático de ganancia para señal en Geopsy	41
Figura 31. Ventana de relación H/V en Geopsy	41
Figura 32. Ventana <i>time</i> en Geopsy	42
Figura 33. Ventana <i>raw signal</i> en Geopsy	43
Figura 34. Ventana <i>Processing</i> en Geopsy	44
Figura 35. Ventana <i>Output</i> en Geopsy.....	45
Figura 36. Relación entre velocidad de onda P y S a partir de las densidades	46
Figura 37. Histograma de distribución de frecuencia general	49
Figura 38. Diagrama de caja general	51
Figura 39. Histograma de distribución frecuencial para el primer pico	52
Figura 40. Histograma de distribución frecuencial para el segundo pico	53
Figura 41. Histograma correspondiente al tercer pico	54
Figura 42. Facies sísmicas	56
Figura 43. Ubicación de Perfil 1 (paralelo a la cordillera).....	57
Figura 44. Perfil paralelo a la cordillera de los Andes en relación a tomografía de cociente espectral y picos poco definidos	58
Figura 45. Ubicación de perfil	59
Figura 46. Perfil 2 y relación de picos múltiples (estaciones B018 y B027)	60
Figura 47. Ubicación referencial de estaciones en estudio de pozos y transecto sísmico con unidades depositacionales.....	61
Figura 48. Ubicación de Perfil 3	62
Figura 49. Perfil 3 asociado al transecto sísmico A-A'.....	62
Figura 50. Ubicación de Perfil 4	63

Figura 51. Perfil 4 relacionado a picos definidos (estaciones B043 Y B050).....	64
Figura 52. Mapa de isoperíodos para capa 1.....	66
Figura 53. Mapa de isoperíodos para capa 2.....	68
Figura 54. Mapa de isoperíodos para capa 3.....	69
Figura 55. Mapa de espesores para la primera capa.....	71
Figura 56. Mapa de espesores para la segunda capa.....	72
Figura 57. Mapa de espesores para la tercera capa.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Cuadro comparativo basado en la desviación estándar para los diferentes picos	48
Tabla 2. Análisis descriptivo general	50
Tabla 3. Análisis descriptivo para el primer pico	52
Tabla 4. Análisis descriptivo para el segundo pico	53
Tabla 5. Análisis descriptivo para el tercer pico	54

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde 1958 hasta hoy, todo el panorama económico venezolano se relaciona al sector petrolero, ello significa que se mantienen los esquemas de una economía mono-productora, ya que sigue siendo el petróleo, el más importante factor en la economía nacional dada la fuerte entrada de divisas que genera por medio de transacciones comerciales con el exterior; es por ello, que se hace vital el estudio a detalle de las cuencas, a fin de localizar nuevos yacimientos de hidrocarburos para mantener la producción nacional.

En este caso, el objeto de estudio es la cuenca Barinas-Apure, pues no ha sido desarrollada comercialmente por completo, a pesar de haber estado bajo procesos de exploración y ser considerada la tercera cuenca de importancia en Venezuela por su volumen de recursos petrolíferos, ya que se compone de una serie de campos petrolíferos que pueden ser de gran interés para la explotación del petróleo. Estos crudos presentan una gravedad API de 28° a 30°, lo que los clasifica como crudos livianos, por lo que se consideran de relevante importancia económica para el país.

Con este fin, en Venezuela se han realizado diversos estudios a fin de caracterizar el subsuelo y obtener modelos estructurales de las diversas zonas del país. Sin embargo, estos proyectos requieren un proceso logístico bastante amplio y recursos económicos importantes, lo cual dificulta en ocasiones su realización. Es por ello que se estudia la aplicación de un método alternativo como lo es el **método de ruido sísmico ambiental**, opción que ha sido considerada ya que podría disminuir los costos, generar mapas con igual o mejor resolución y mitigar los daños ambientales producidos.

El ruido sísmico es un método de exploración aplicando el método de Nakamura, que consiste en la evaluación del ruido propio del subsuelo, esto a fin de calcular los períodos

fundamentales de la zona de estudio y determinar la estructura del subsuelo; Dos Santos y Rodríguez (1982), realizaron un estudio de ruido sísmico en la cuenca Oriental de Venezuela, mientras que Linares (2005) aplicó el método en áreas urbanas de Caracas. En este caso, la aplicación de este método en la cuenca Barinas-Apure, podría generar resultados positivos, obteniendo información del período de vibración natural del suelo, además de permitir modelar el subsuelo, obteniendo un modelo del espesor sedimentario de la zona.

El estudio de ruido sísmico presenta ventajas, en varios aspectos: metodológicamente, se considera una innovación, ya que este método no ha sido utilizado antes para el estudio de cuencas; industrialmente es efectivo, porque constituye un dato de calidad con bajo costo a nivel de adquisición, y ambientalmente, su estado no invasivo permite que sea considerado apropiado para realizar la caracterización.

En este caso, se caracterizará la cuenca Barinas-Apure, a partir del levantamiento de datos de ruido sísmico en un mallado de estaciones a fin de calcular el período fundamental de las mismas y determinar los espesores sedimentarios de la región.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar el área suroeste de la cuenca Barinas-Apure mediante la adquisición de ruido sísmico ambiental utilizando el método de Nakamura.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar una base de datos a partir de la adquisición de ruido ambiental en estaciones ubicadas en la región sur-este de la cuenca Barinas Apure.
- Calcular el período fundamental para cada estación establecida.
- Estimar a partir del método de Nakamura, el período fundamental de la región de estudio.
- Generar mapas de iso-períodos de la región de estudio.
- Determinar el espesor sedimentario de la región de estudio

relación H/V se ajusta muy bien a la descripción antes hecha y ha sido recibida con gran atención por su simplicidad junto con la rápida información acerca de las características dinámicas de los suelos y las estructuras (Nakamura, 1989). Algunos estudios han sido realizados previamente a nivel nacional e internacional, poniendo en práctica este método para diferentes fines.

Miranda, Venezuela: Caracterización geofísica mediante estudios de ruido sísmico ambiental y gravimétrico del Municipio Plaza, Guarenas, estado Miranda.

(Rocabado et al., 2011).

En los años 2003 hasta 2005 se han realizado estudios de ruido ambiental, mediciones de sísmica de refracción y mediciones gravimétricas, en Guarenas-Guatire a objeto de obtener información del suelo de la ciudad, en el marco del estudio de Microzonificación Sísmica llevada a cabo por FUNVISIS. Los períodos predominantes obtenidos a partir del análisis de la relación H/V, varían entre 0,23 s y 2,2 s. Al este de la cuenca Guarenas-Guatire, en Guatire los valores oscilan entre 2,2 s y 1,6 s, que corresponden a un espesor de sedimentos, de 270 metros, mientras que para la zona oeste (Guarenas), los valores disminuyen, encontrándose en su mayoría entre 0,8 s y 1,4 s que corresponde a un espesor de sedimentos de 200 m.

Caracas, Venezuela: Relación entre período del suelo y profundidad de los sedimentos para la ciudad de Caracas, Venezuela (Rocabado et al., 2011)

En el marco del proyecto de microzonificación sísmica de la ciudad de Caracas, se realizó desde mediados de los años 90 mediciones de ruido ambiental con el fin de conocer el valor de período fundamental de suelo. Se planteó el uso de una nueva relación que incluía el efecto de las capas superficiales de sedimentos, considerando los valores de velocidades de ondas de corte para los primeros 30 m (V_{s30}) y el valor de V_s para el estrato más profundo. Los resultados obtenidos indican que la relación entre período y profundidad genera estimaciones más exactas del espesor de sedimentos. La misma fue calibrada y verificada con valores reales de profundidad de 4 pozos profundos realizados en la ciudad de Caracas obteniendo resultados bastante ajustados a los valores reportados por la perforación.

Mérida, Venezuela: Determinación de períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Mérida, Venezuela, a partir de mediciones de ruido sísmico ambiental (Mazuera et al., 2009).

Los Andes Venezolanos representan una región de alta amenaza sísmica motivada a la presencia de la falla de Boconó. Es por ello, que surgió la necesidad de realizar un estudio para determinar los períodos fundamentales del suelo en la ciudad de Mérida, a partir de mediciones de ruido ambiental y con la aplicación del método de Nakamura. Para cumplir con dicho objetivo, se aplicó la técnica a 164 mediciones realizadas en diversas partes de la ciudad, con un espaciamiento de 500 metros aproximadamente y con un tiempo de grabación de 15 a 20 minutos. Se elaboró un mapa de distribución de períodos, donde se refleja un mínimo de 0,087 segundos para el sector de San Jacinto, en el sureste, y un máximo de 1 segundo para la parte alta del sector Los Curos, al noroeste de la ciudad de Mérida. En este sentido, las zonas donde los valores de períodos son más altos se pueden asociar con espesores de sedimentos mayores, mientras que las zonas donde los períodos son mínimos, el espesor sedimentario será menor.

Sucre, Venezuela: “Comparación cortical basada en las propiedades dinámicas medias de las ciudades de Cumaná y Cumanacoa, estado Sucre, Venezuela” (Bonive, 2009).

En este trabajo se evaluaron las estructuras corticales derivadas de las propiedades dinámicas de los suelos de las ciudades Cumaná y Cumanacoa, estado Sucre, Venezuela. Se obtuvieron curvas de espectros de frecuencias (H/V) en registros de ruido ambiental. Estas curvas se compararon usando mínimos cuadrados con las que se obtienen aplicando el modelo propuesto por la técnica especializada de dos capas, para las microtrepidaciones del suelo. Las soluciones tienen dos rangos de profundidad posibles, una superficial y la otra profunda, y esto parece depender del rango de frecuencias en el cual se hallan los picos de resonancia. Basados en los resultados, se concluyó que el espesor sedimentario es significativamente menor en Cumanacoa que en Cumaná. Por otro lado, la extinción y el ruido de fondo son menores en Cumanacoa que en Cumaná.

Almería, España: “Desarrollo y evaluación de métodos avanzados de exploración sísmica pasiva” (García, 2010).

Se ha utilizado el método de Nakamura para explorar la geometría del basamento en la cuenca de Zafarraya (Granada). Al tratarse de una cuenca relativamente extensa y poco profunda y con un contraste de velocidades entre los sedimentos y el basamento no extremadamente alto (2-3), las variaciones en el campo de ondas están gobernadas por las respuestas 1D de cada punto y no por resonancias 2D y 3D. Ello permitió realizar un ajuste entre la frecuencia del pico principal del cociente espectral y la profundidad del basamento usando 17 puntos de la cuenca en los que se disponía de información geotécnica, utilizando después esta relación para inferir la profundidad del basamento en una malla densa de puntos en los que se determinó la frecuencia de resonancia. Esto permitió generar un modelo 3D del basamento. Adicionalmente, se obtuvieron relaciones exponenciales que describen la variación de la velocidad de onda S con la profundidad para la cobertura sedimentaria de la cuenca, suponiendo su homogeneidad lateral y variaciones suaves en vertical.

Santiago de Chile, Chile: “Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements” (Bonney et al., 2008)

Se realizaron mediciones extensas de vibración ambiental en la cuenca de Santiago de Chile (Chile), a fin de probar la fiabilidad de los espectros de amplitud horizontal a vertical método de relación (H/V) como una herramienta para proporcionar información cualitativa y cuantitativa de los efectos de sitio en medios geológicos complejos. Sin embargo, revelan una discrepancia entre las frecuencias de resonancia del suelo calculado y la resonancia obtenida, por lo tanto no conduce a una interpretación recta de la distribución de la intensidad derivada del daño observado a una casa de dos plantas en Santiago tras el terremoto de 1985, Valparaíso. De hecho, la técnica H / V mapea sobre todo la primera frecuencia fundamental; sin embargo, no logra mostrar modos de resonancia más altas. En el caso de la ciudad de Santiago, este método funciona bien para la evaluación de la amenaza sísmica para edificios de gran altura, pero es cuestionable para estructuras más pequeñas como es el caso de un gran porcentaje de las construcciones en la ciudad.

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

El objetivo de este trabajo fue caracterizar y estimar 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 km², en el borde sureste del lago de Maracaibo. El procesamiento se realizó mediante el programa de interfaz gráfica Geopsy, utilizando los parámetros recomendados por la guía SESAME, para cuencas profundas. Se observó que en los cocientes espectrales H/V se generaba 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. Asimismo se realizaron mapas de periodos y espesores referidos a cada pico, lo que permitió observar los cambios laterales y la geometría de la cuenca.

***Barinas, Venezuela:** Caracterización geofísica del área noroeste de la cuenca Barinas-Apure (estado Barinas) mediante el análisis de microtemores (método de Nakamura) (García, 2014)*

Se adquirieron un total de 45 estaciones distribuidas en tres perfiles en dirección NO-SE, utilizando la relación espectral H/V. Se logró definir tres picos de período fundamental con los cuales fueron estimadas las profundidades correspondientes a cada capa. Se realizaron mapas de isoperíodos y espesores sedimentarios pertenecientes a la primera y a la última interfase sedimentaria, obteniendo espesores entre 112 y 505 m para la primera capa, con los mayores espesores ubicados hacia el sur, y para la tercera capa, se obtuvieron espesores entre 2394 y 3777 m, concentrados al pie de monte Andino y hacia el noroeste del estado Barinas. Se pudo definir que dicha respuesta corresponde al contraste de impedancia entre las formaciones Guanapa, Río Yuca, Parángula y Pagüey, donde la geometría de la cuenca se encuentra dominada por los eventos tectónicos ocurridos durante el levantamiento de la cordillera Andina.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

La cuenca de Barinas – Apure, también conocida como cuenca Occidental, es una cuenca antepaís, posee un área de aproximadamente 338.475 km². Se encuentra ubicada en la región suroccidental del país, abarcando los estados Barinas, Apure y Portuguesa y limitada:

- Al noroeste, por los contrafuertes de la cadena de los Andes Venezolanos.
- Al norte, por la prolongación occidental de la serranía del interior Central.
- Al este y noreste, por el levantamiento del Baúl.
- Al sur está separada de la cuenca de los llanos colombianos por un alto gravimétrico situado entre los ríos Apure y Arauca (figura 2).

Su estructura se basa en una depresión estructural asimétrica con el flanco meridional suavemente inclinada al noreste y el flanco septentrional marcado por afloramientos que forman parte del flanco sudeste de Los Andes Venezolanos (González de Juana, et al.,1980).



Figura 2. Principales cuencas petrolíferas de Venezuela (Schlumberger Oilfield Services, 1997).

2.1 EVOLUCIÓN DE LA CUENCA BARINAS-APURE

2.1.1 Pre-Cretácico

Debido a los procesos tectónicos sufridos por el norte de la placa Suramericana a lo largo de su historia, existen cuerpos precámbricos de dos clases: alóctonos y autóctonos. Los terrenos autóctonos se localizan en el escudo de Guayana y como basamento de las cuencas paleozóicas a cenozoicas al sur de la falla de Apure, aunque no se pueden discriminar provincias como en Guayana, dado que muy pocos taladros han logrado alcanzar el basamento precámbrico y las descripciones son muy pobres (Andrade, 2001).

El terreno autóctono se encuentra en el subsuelo de la Cuenca Oriental y en la Barinas-Apure, al sur de la falla de Apure, (figura 3) caracterizado por rocas de “Capas Rojas” que marcan la apertura de la Gondwana y Laurentia evidenciada en la secuencia cámbrica preservada en las depresiones estructurales en dichas cuencas (Yoris y Ostos, 1997)

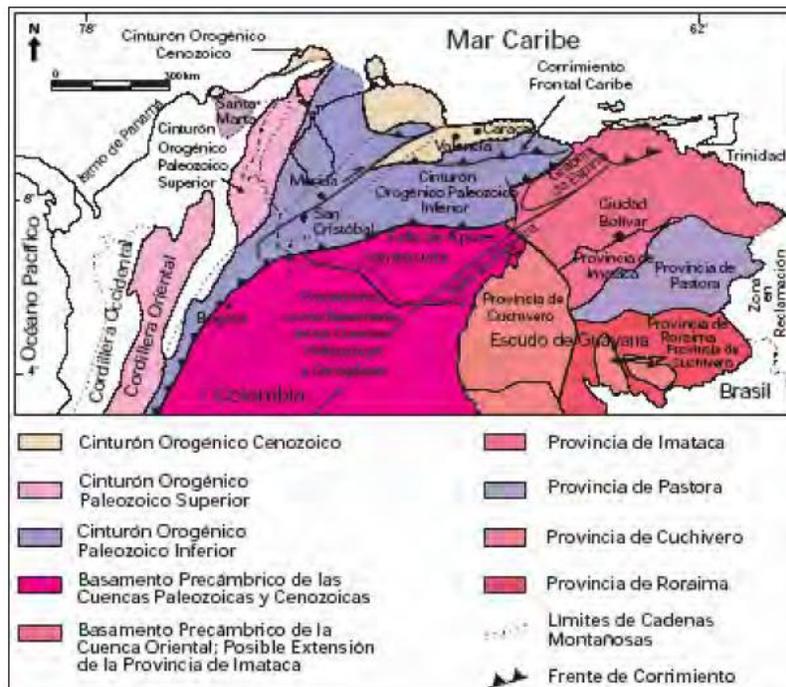


Figura 3. Mapa de distribución de terrenos autóctonos en el norte de Suramérica. Tomado de Yoris y Ostos (1997).

Los terrenos alóctonos por su parte (figura 4) iniciaron el adosamiento en Suramérica durante el Paleozoico Temprano (Orogénesis Caledoniana), incluye rocas que afloran en los alrededores de Mérida y San Cristóbal.



Figura 4. Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el norte de Suramérica. Tomado de Yoris y Ostos (1997)

El “rifting” o rotura de Pangea produjo varias estructuraciones importantes que posteriormente influyeron en la evolución de las cuencas sedimentarias venezolanas. Se plantea que durante este evento, se separa la placa Suramericana de los bloques Chortis, Oaxaca y Yucatán relacionada a la apertura del golfo de México o Proto-Caribe, induciendo el desarrollo de valles de extensión o grábenes (figura 5), con una tendencia noreste, en los que se incluyen los grábenes de Apure-Mantecal y Espino, así como también los grabenes de los Andes y Perijá, y el ubicado en el lago de Maracaibo (Andrade, 2001).

Estos valles de extensión fueron rellenos sintectónicamente por las formaciones La Quinta (cuenca Barinas-Apure) e Ipire (cuenca Oriental) durante el Jurásico, con sedimentos

continentales de “capas rojas” volcánicas de diversa índole y eventualmente clásticos y calizas de inversiones marinas (Yoris y Ostos, 1997)

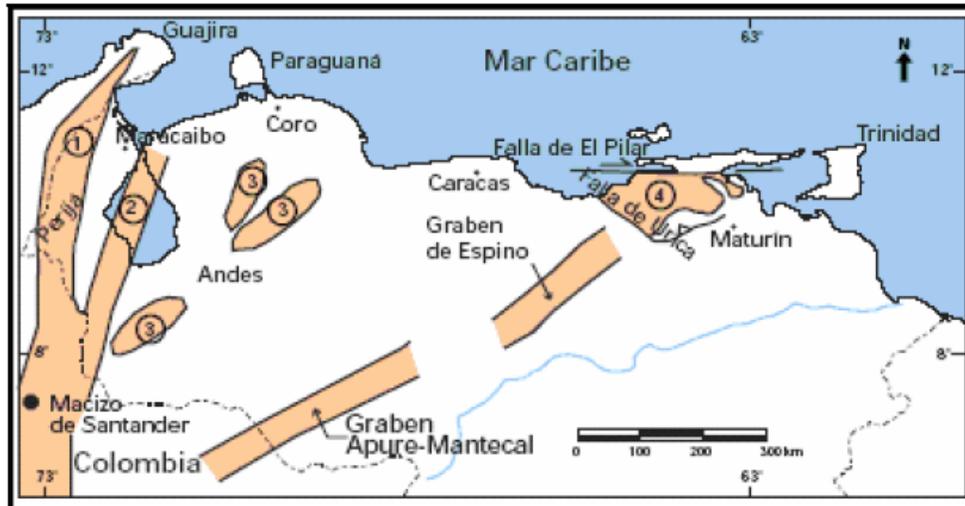


Figura 5. Distribución de valles de extensión o grábenes (Jurásico) en Venezuela.

Tomado de Yoris y Ostos (1997)

2.1.2 Cretácico

Debido a la acreción del alóctono del Paleozoico Superior contra el Inferior, se identifican rocas graníticas producto de la subducción por debajo del borde norte de la placa Suramericana y esto se evidencia por las rocas presentes de edad Carbonífero que se encuentran en el subsuelo de la cuenca Oriental, Maracaibo y Barinas-Apure (Yoris y Ostos, 1997)

Según González de Juana *et al.*, (1980) en el Albiense, la invasión de la cuenca por mares procedentes del norte generó la sedimentación hacia el norte de las formaciones Aguardiente y Maraca de ambiente nerítico (figura 6).

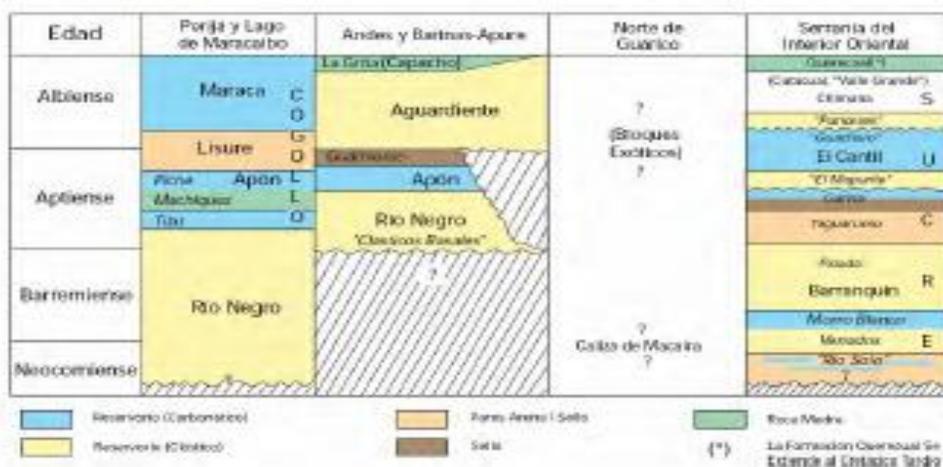


Figura 6. Cuadro de correlación de unidades más importantes dentro del Cretácico Temprano en Venezuela. Tomado de Yoris y Ostos (1997)

Luego, en el Cenomaniense y Maastrichtiense (figura 8) ocurre el avance de la invasión marina con sedimentación de las formaciones Escandalosa, La Morita, Quevedo y Burgüita. Esta invasión marina coincide con el pulso mundial transgresivo del Cretácico Tardío, responsable de la sedimentación de calizas, lutitas y ftanitas ricas en materia orgánica tanto en América como en Europa generándose las formaciones La Luna, Navay y Querecual (figura 7) que son rocas madres por excelencia en las cuencas petrolíferas de Venezuela. Yoris y Ostos, 1997)

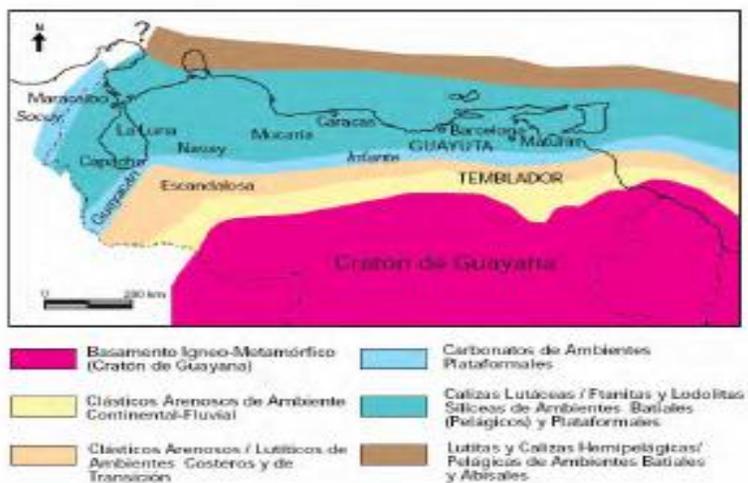


Figura 7. Distribución de facies sedimentarias que dominaron durante el Cenomaniense-Campaniense (Cretácico Tardío). Tomado de Yoris y Ostos, 1997.

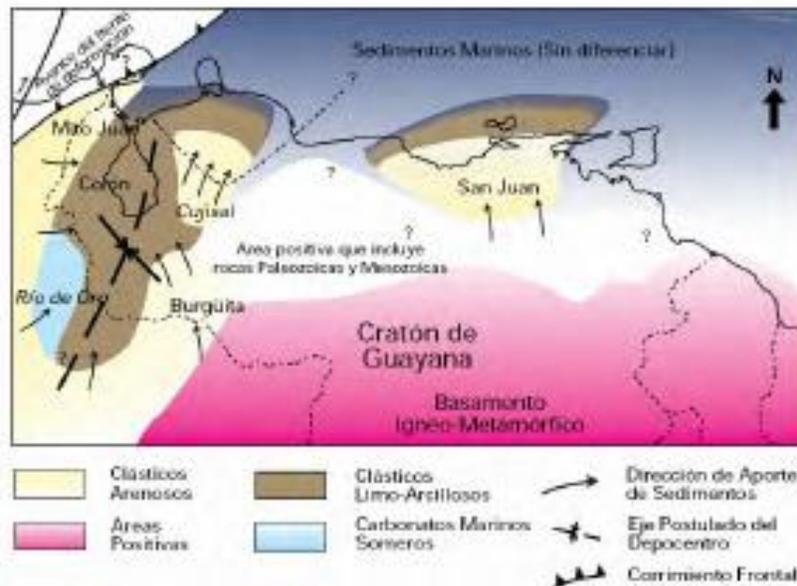


Figura 8. Distribución de facies sedimentarias durante el Maastrichtiense (Cretácico Tardío) al norte del Escudo de Guayana. Tomado de Yoris y Ostos, 1997.

2.1.3 Post-Cretácico

Al final del cretácico se produjo una regresión general hacia el norte, generando una emergencia casi total de la cuenca, lo que produjo una extensa erosión. En el Eoceno Medio se produjo una transgresión generalizada sobre toda la cuenca que generó la depositación de la formación Gobernador en un ambiente marino poco profundo, seguido por una subsidencia regional con sedimentación lutítica localmente euxínica hacia el norte, provocando la depositación de la formación Pagüey y el desarrollo de fallas normales sintectónicas evidenciadas en este período (De Toni *et al.*, 1994). Posteriormente, en el Eoceno Superior se produjo una regresión general de las aguas hacia el norte y este, reactivando los levantamientos y fallas eocenas. Durante el Neogeno se formó en el Occidente del país, la cuenca Barinas-Apure producto de la orogénesis andina entre Colombia y Venezuela. La orogénesis en la parte septentrional de Venezuela durante el Plioceno, ayudó a definir las cuencas petrolíferas actuales y levantó el sistema de montañas del Caribe y el ramal de los Andes Venezolanos.

2.2 ESTRUCTURA DE LA CUENCA BARINAS-APURE

La depresión estructural que caracteriza la cuenca Barinas-Apure se extiende desde la antifosa andina al noreste, hasta las planicies situadas entre los ríos Apure y Arauca al sureste (figura 9), el poco espesor de la columna sedimentaria cerca de la zona de fallas de Mantecal y el espesor de las formaciones cretácicas y la erosión prácticamente total de la sedimentación eocena, González de Juana *et.al.*(1980)

La prolongación del macizo de Colorado en dirección sureste en el subsuelo, subdivide la cuenca mayor en las sub cuencas o depresiones: la del Uribante al oeste y la de Barinas al noreste. Entre ambas, la más importante, es la sub cuenca de Barinas, la cual tiene forma de media luna con la flecha del arco dirigida hacia el oeste-noreste. La media luna está cortada al noreste por el sistema de fallas marginales del flanco sur-andino y más hacia el norte y noreste por los corrimientos frontales del sistema montañoso del Caribe.

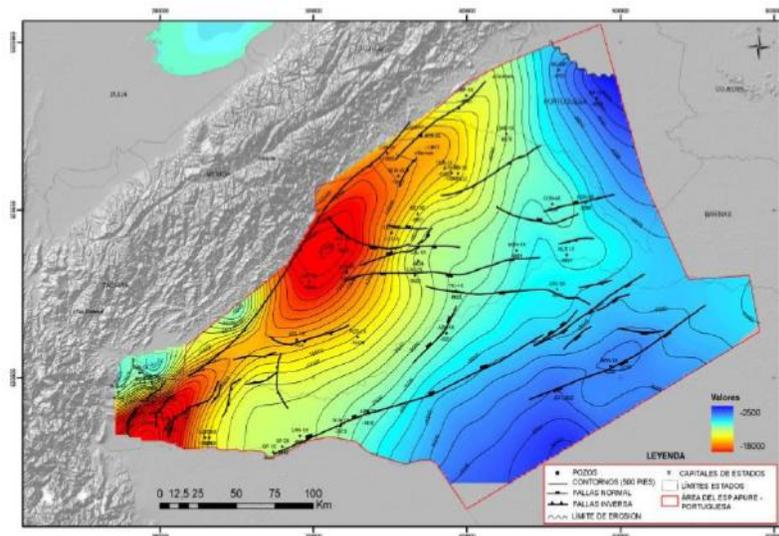


Figura 9. Mapa estructural en profundidad de la cuenca Barinas – Apure (PDVSA, 2014).

En el flanco sur de la cuenca, por su parte, las curvas estructurales a diversos niveles conservan cierto paralelismo ajustado a la forma de la depresión, Feo (1972).

Feo (1977) indica que su interpretación morfo-tectónica en fotos aéreas convencionales e imágenes de satélite se proyecta muy tenue y localmente, a lo largo de su traza sobre la

superficie de la cuenca. El flanco sur sufrió deformaciones muy suaves a lo largo de su historia a partir del Cretácico y no muestra mayormente efectos compresivos.

Sus estructuras son principalmente fallas normales de rumbo este-oeste, norte y noreste que ocasionan levantamientos menores y bloques ligeramente arqueados entre ellas (González de Juana *et al*, 1980)

La cuenca Barinas-Apure está constituida por formaciones que se generaron en períodos geológicos diferentes entre ellas: Gobernador, Pagüey, Rio Yuca, Navay, Parángula, Aguardiente, Escandalosa (figura 10)

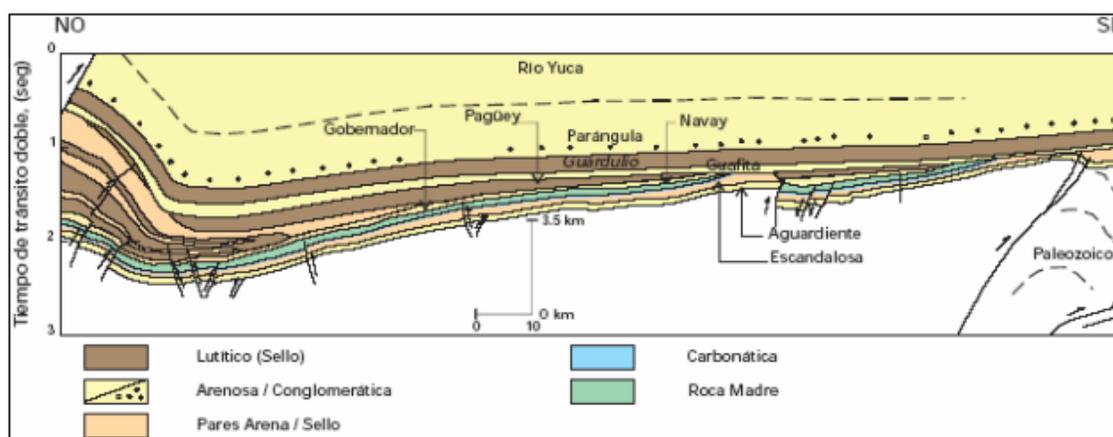


Figura 10. Sección NO-SE de la cuenca Barinas-Apure (Modificado de Parnaud; *et al*.1995). Tomado de Yoris y Ostos (1997)

2.3 MARCO ESTRATIGRÁFICO DE LA CUENCA BARINAS-APURE

Las columnas estratigráficas de la zona de estudio, permiten detallar las formaciones depositadas sobre el basamento desde el periodo Pre-cretácico hasta la actualidad, sin embargo, por el alcance de esta investigación, se describirán las características de las formaciones a partir del Cretácico Tardío hasta hoy, tomando en consideración la composición litológica de cada período (figura 11)

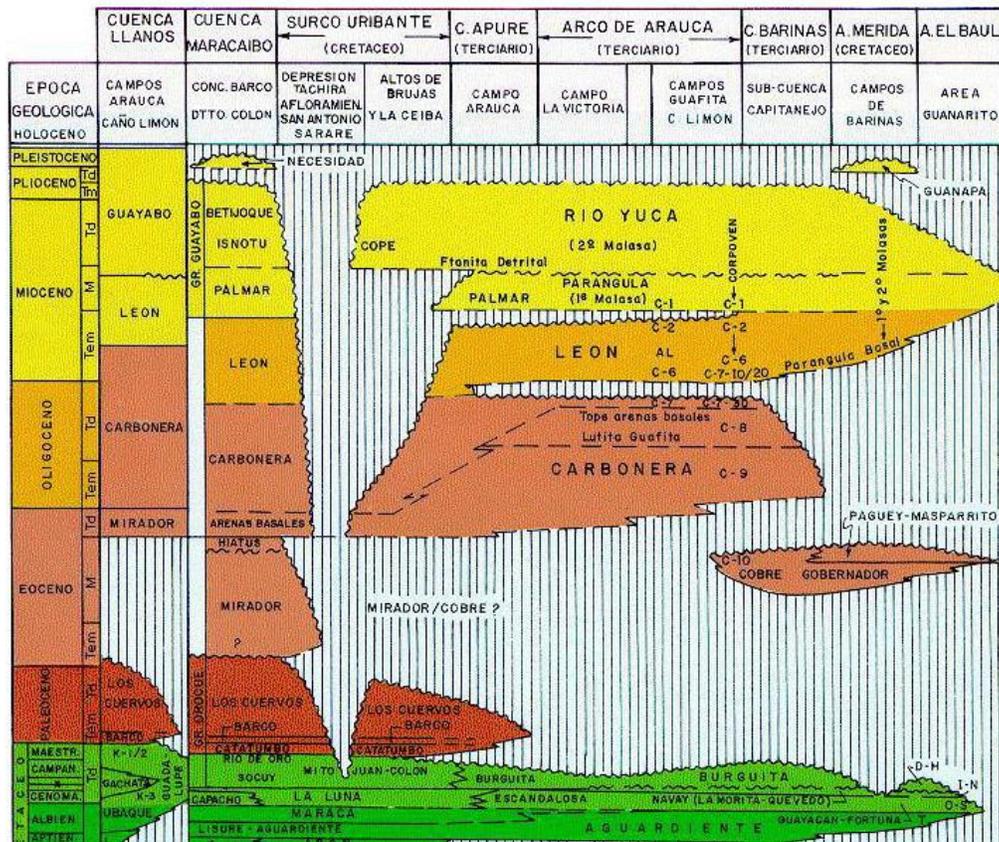


Figura 11. Correlación estratigráfica a partir del Cretácico Tardío. Modificado de Kiser (1989)

2.3.1 Formación Gobernador

La Formación Gobernador comprende clásticas basales, depositadas discordantemente encima del Cretáceo, por la transgresión marina iniciada en la cuenca de Barinas en el Eoceno medio (figura 12). Pierce (1960) describe a la formación con 80% de areniscas cuarzosas, a veces cuarcíticas, friables a bien endurecidas, color gris claro a pardo, manchadas por óxido de hierro cuando están meteorizadas, localmente conglomeráticas, en capas de espesor medio a grueso, y con estratificación cruzada, el porcentaje restante de intercalaciones de limolitas en colores claros, y laminaciones lutíticas carbonáceas gris oscuro a gris azulado.

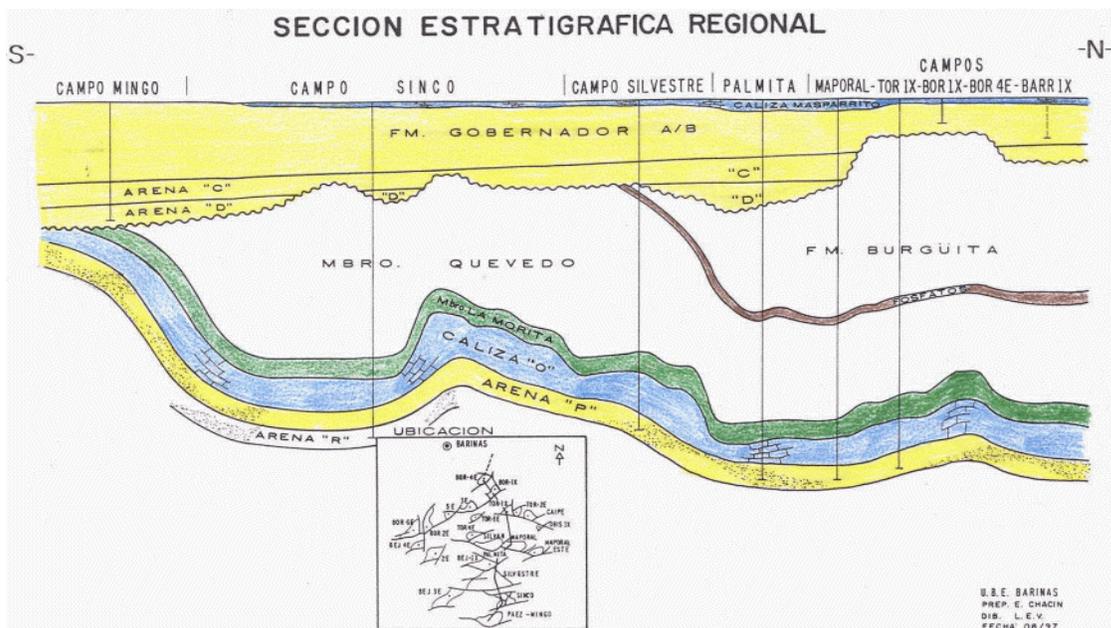


Figura 12. Sección estratigráfica regional. Tomado de PDVSA (2007)

2.3.2 Formación Pagüey

Predominancia de lutitas marinas grises a negras, duras, astillosas, bien laminadas, muy foraminíferas y con niveles comunes de nódulos sideríticos, incluso, ftaníticas. En el subsuelo (Von Der Osten, 1966), la parte inferior, de unos 130 m de espesor, consiste en una secuencia cíclica de lutitas que gradan hacia arriba a limolitas y areniscas de grano fino. Los 250 m superiores del campo Sinco son casi totalmente lutitas. En la superficie, Pierce (1960), observa que "Areniscas grises claras a grises azuladas, ocasionalmente petrolíferas, en capas delgadas a medianas, de grano fino a medio, lutolíticas macizas y limolitas y lutitas en estratos irregulares constituyen una gran parte de la formación". En la parte superior, las areniscas son "ferruginosas, carbonáceas, ocasionalmente calcáreas, grises a grises oscuras, frecuentemente meteorizando a pardo, de grano fino a medio, lajosas y con rizaduras; éstas alternan con lutitas y limolitas fosilíferas, en estratos irregulares, grises oscuras a negras." Pierce (1960) midió un espesor máximo no-fallado de 1913 m en la sección tipo. Von Der Osten (1966) encontró 350-445 m en el campo Sinco. Regionalmente, el espesor remanente de Pagüey aumenta, desde el Area Mayor Sinco-Silvestre, hacia el norte y noreste, en dirección del surco de Trujillo al este del lago de

Maracaibo (figura 13). Se acuña erosionalmente contra el flanco suroeste del arco El Baúl. Desaparece al suroeste por interdigitación con la facies arenosa de la formación Cobre.

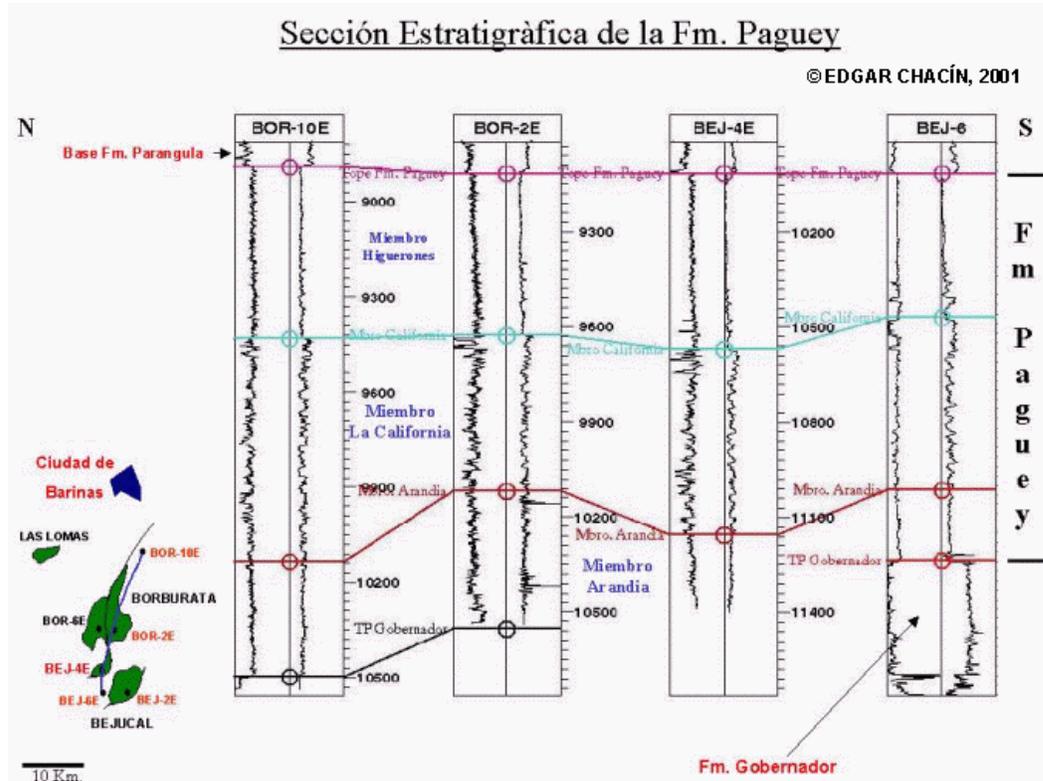


Figura 13. Sección estratigráfica de la formación Pagüey. Tomado de PDVSA (2007)

2.3.3 Formación Río Yuca

Pierce (1960), menciona que la unidad está compuesta esencialmente de estratos macizos de conglomerados, areniscas, limolitas y arcillitas de color pardo claro a verde gris-verdoso. Los constituyentes principales de los conglomerados son guijarros y peñones de rocas ígneas y metamórficas. En otras áreas se presentan estratos gruesos de areniscas gris claro a pardo claro, de grano medio a grueso, mal cementadas, mal escogidas, muy porosas, micromicáceas y localmente caoliníticas, masivas a localmente con estratificación paralela y cruzada. Las limolitas y arcillitas son de color gris claro, amarillo pálido, pardas, ocasionalmente verdes a azul verdoso; son macizas a bien estratificadas, muy blandas,

plásticas, micromicáceas y con restos de materia vegetal. Pierce (1960) estimó un espesor de 2.300 m.

2.3.4 Formación Navay

Pierce (1960), la describe como compuesta de lutitas silíceas, friables a no friables, blandas, duras, quebradizas, amarillo claro a crema y a blanco; lutitas tripolíticas muy porosas, pardo claro a gris claro, y algunas fñanitas no porosas, lenticulares, pardo claro, y lutitas calcáreas, carbonáticas, gris a gris oscuro. Como constituyentes menores de la formación, se presentan areniscas lenticulares de grano angular, calcáreas a silíceas, pardo claro a gris claro. Estas areniscas, muy calcáreas a veces, se han definido como calizas clásticas, probablemente por su contenido fosilífero. En el afloramiento, la formación se meteoriza comúnmente a colores claros: gris claro, blancuzco, beige, marrón clara y con una textura silícea porosa, "tripolítica" o "porcelanizada". El espesor es de 940 m (3.084') (Pierce, 1960), y de 610 m (2000 pies) en el área de Burgua (Kiser, 1989). Tiende a aumentar rápidamente al acercarse al surco de Uribante, y se acuña hasta extinguirse hacia el sur de Apure y los llanos colombianos así como localmente sobre el Arco de Mérida. (Kiser, 1989).

2.3.5 Formación Aguardiente

Notestein *et al.* (1944) mencionaron areniscas calcáreas duras, de color gris a verde claro, grano variable y estratificación cruzada, localmente glauconíticas, con intercalaciones de lutitas micáceas y carbonáceas y algunos lechos de caliza en la parte inferior; localmente las areniscas son tan calcáreas que se aproximan a calizas arenosas. O. Renz (1959) acertadamente insistió sobre el carácter cuarzoso y los colores claros de meteorización de las areniscas, las intercalaciones de lutitas oscuras, y la presencia de caliza fosilífera de varios tipos. Salvador (1961) mostró un espesor de 504 metros en el área Chejendé-Mitón, y O. Renz (1959) aproximadamente 400 metros en la sección del Cerro Peñas Altas, en Lara.

2.3.6 Formación Escandalosa

La formación está compuesta por areniscas macizas, cuarzosas y muy glauconíticas, con cantidades menores de lutitas negras calcáreas. Las areniscas son de color gris, gris oscuro a marrón claro y verdoso, de grano fino a medio, bien escogidas, micáceas y carbonáceas. Se presentan en capas delgadas a masivas, con estratificación cruzada en las capas más gruesas. Las lutitas son gris oscuro, algo arenosas, calcáreas y carbonáceas. En el tope de la sección, se encuentra una caliza de unos 4 m de espesor, gris oscura, masiva, aura, cristalina y coquinoidea, con manchas de dolomita microcristalina (Kiser, 1989). Presenta 300 m en la sección tipo, entre 150 y 427 m en otras localidades. Aumenta de espesor aún más hacia el surco de Uribante. En la presa La Vueltoza, la formación tiene un espesor de 186 m, incluyendo 18 m de la caliza Guayacán. (Kiser, 1989).

2.3.7 Formación Parángula

En la superficie, predominan los conglomerados lenticulares de grano grueso, de color gris a verdoso y pardo claro a blanco; areniscas de grano fino en capas masivas con estratificación cruzada, localmente glauconíticas; limonitas y lodolitas abigarradas a tonos rojos, morados, pardo rojizo y pardo claro. En el subsuelo, la litología es similar, pero con la ausencia de los conglomerados. Aquí, es notable el carácter regresivo (engrosamiento hacia arriba) de la formación, que se inicia con una gruesa arenisca basal, gradando hacia arriba a arcillas y limolitas varicoloreadas y no-calcáreas, alternando con areniscas arcillosas de grano fino, micáceas y lenticulares. Esta parte inferior tiene algunos elementos litológicos, como la escasa presencia de glauconita, que indican una influencia marina. La parte superior vuelve gradualmente mas arenosa, con aumento en el tamaño de los granos y limpieza de las arenas. Campos (1977) nota la interestratificación de los colores típicos de cada formación cerca del contacto entre ellas. Mide 550 m de espesor en la sección tipo. Pierce (1960) nota que aumenta su espesor hacia el sur y oeste, estimando que llegue hasta 1400 m, e indica que se adelgaza rápidamente hacia el noreste hasta los alrededores de Guanare; no la reconoce al noreste del río Portuguesa.

CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO

3.1 ONDAS SÍSMICAS

Son oscilaciones que se propagan desde una fuente a través de un medio material elástico (sólido y líquido) transportando energía mecánica. Se clasifican en Corpóreas y Superficiales.

3.1.1 Ondas corpóreas

Las ondas corpóreas viajan por el interior de la Tierra y se clasifican en primarias (P) y secundarias (S).

Ondas P

Las **ondas P** (ondas primarias o longitudinales) son ondas elásticas con un movimiento de empuje y tracción, que provoca que las partículas en la roca se muevan en la misma dirección de la propagación de energía; debido a la velocidad con que se propagan, son las primeras en alcanzar la superficie de la Tierra (figura 14). Pueden moverse a través de sólidos, líquidos o gases.

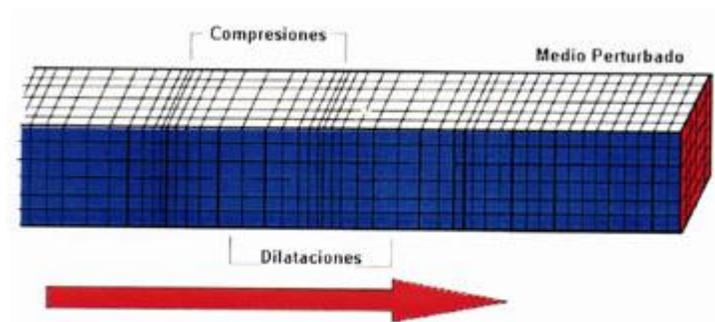


Figura 14. Ondas P. Tomado de glosario FUNVISIS (2002)

Ondas S

Las **ondas S** (secundarias o transversales) son ondas elásticas con movimiento perpendicular a la dirección de propagación de la energía, viajan mucho más lentamente que las ondas P (figura 15). No se expanden a través de líquidos. Este movimiento es responsable del daño en las estructuras.

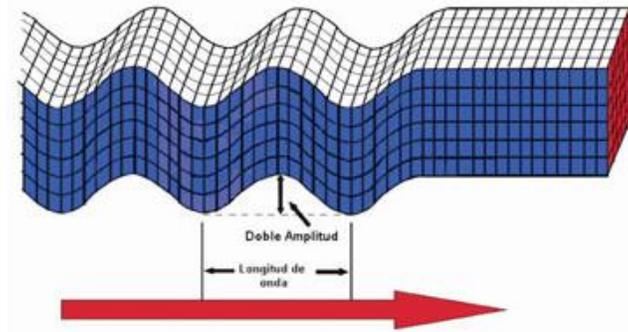


Figura 15. Ondas S. Tomado de glosario FUNVISIS (2002)

3.1.2 ONDAS SUPERFICIALES

Ondas Love

Son ondas superficiales cuyo movimiento es perpendicular a la dirección de energía de propagación (figura 16), pero a diferencia de las ondas S, estas se polarizan en el plano de la superficie de la Tierra, y solo con componente horizontal a superficie.

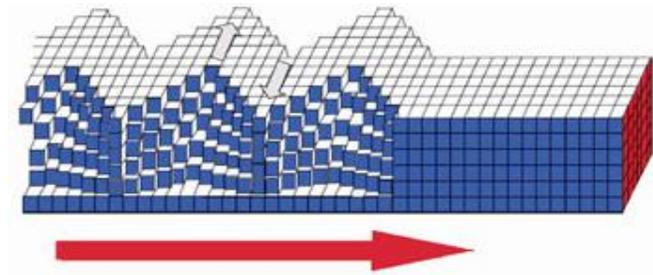


Figura 16. Ondas Love. Tomado de glosario FUNVISIS (2002)

Ondas Rayleigh

Son ondas superficiales con desplazamiento que describen un trayecto elíptico en el plano vertical que contiene la dirección de propagación de la onda (figura 17). Son de carácter dispersivo, las longitudes de onda se propagan con velocidades diferentes, resultan de utilidad para la evaluación de la variación de la velocidad con la profundidad.

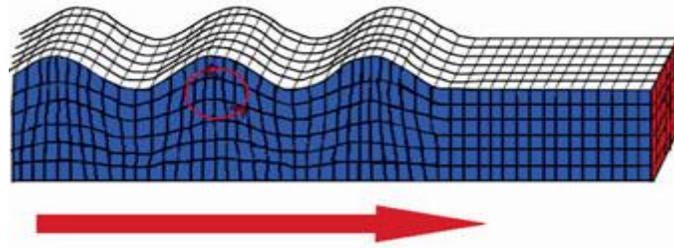


Figura 17. Ondas Rayleigh. Tomado de glosario FUNVISIS (2002)

3.2 DISPERSIÓN DE ONDAS RAYLEIGH

Se define como dispersión al cambio de velocidad de propagación de las ondas Rayleigh en función de la longitud de onda (λ) o de la frecuencia (f). Este fenómeno solamente se manifiesta cuando el medio no es homogéneo en términos de la distribución de los valores de V_s según la vertical. En un medio con valores de V_s crecientes con la profundidad las componentes de alta frecuencia (menor longitud de onda) se transmiten a menor velocidad de fase (CR) que las de baja frecuencia (mayor longitud de onda) que además profundizan más en el terreno (Ramírez, 2014).

Las ondas Rayleigh son dispersivas en un medio elástico no uniforme, esto indica que la velocidad de propagación es dependiente de la frecuencia, depende de sus longitudes de onda, las longitudes más largas penetran más profundo que las longitudes de onda más cortas para un modo dado, exhiben mayores velocidades de fase y son más sensibles a las propiedades elásticas de las capas más profundas; mientras que las longitudes de onda más

cortas, tienden a ser más sensibles a las propiedades físicas de las capas superficiales. Este hecho es responsable de la dispersión geométrica, es decir, las frecuencias se propagan con diferentes velocidades en las distintas fases. La dispersión de las ondas Rayleigh se muestran de acuerdo con el desplazamiento vertical asociado con una longitud de onda corta y larga. Ellos pueden estimarse utilizando varios análisis espectral con el objetivo de la recuperación de los modos fundamentales y más altos de propagación de la onda de superficie en una amplia banda de frecuencia (Guerra, 2010).

3.3 MICROTREMORES

Los microtremores, también llamado ruido ambiental o ruido sísmico de fondo, son vibraciones aleatorias inducidas en las masas del suelo y roca por fuentes naturales o artificiales. Existe un amplio rango de contribuciones al ruido de fondo existente que incluyen la presencia de mareas, presión atmosférica, efectos diurnos principalmente asociados con la variación de la temperatura y la actividad inducida por el hombre.

El ruido ambiental ocurre en el intervalo de frecuencias de 0.001 a 30 Hz, sin embargo, para realizar estudios de sismología, es necesario realizar el análisis de los niveles de ruido sísmico en estaciones de registro y en este caso interesa el ancho de banda comprendido entre 0.01 a 10 Hz, ya que en esta banda de frecuencias parte de la energía se transmite como ondas superficiales, que frecuentemente son usadas para estimar las propiedades físicas de la corteza terrestre y aquellas que se transmite como ondas de cuerpo pueden ser usadas para estimar las características de las estructuras geológicas sobre las cuales se encuentra situada la estación Guerra (2010).

Los microtremores comenzaron a estudiarse desde el siglo pasado para la caracterización de suelos y estructuras. Omori (1909) fue el pionero en realizar estos estudios empleando un péndulo inclinado y concluyó que existían vibraciones naturales en el suelo que no correspondían a las sísmicas o pulsaciones oscilatorias. Posteriormente, en los años cincuenta, aparecieron diversas metodologías lideradas por los japoneses sobre el origen y

utilización de los microtemblores para el estudio de las propiedades dinámicas del suelo. Actualmente, el desarrollo y mejora de estas metodologías ha permitido aplicarlas en estudios geotécnicos y de estructuración para la estimación de efectos de sitio y modelos de velocidad.

Algunos estudios indican que el viento da lugar a ruido sísmico de alta frecuencia (entre 15 y 60 Hz) en sitios poblados, y por encima de 5 Hz las fuentes son predominantemente urbanas (García, 2010), por su parte, Díaz *et al.*, (2010) encuentran que la influencia de las olas del mar se evidencia con un pico en la relación espectral alrededor de los 9 segundos. Yauri (2006) afirma que las ondas del mar y otras fuentes naturales inducen temblores de período largo (2-3 segundos o más), los cuales son llamados *microsismos*, y que las fuentes antropogénicas producto de la actividad humana generan temblores de período corto llamados *microtemblores*, y se caracterizan por presentar períodos entre 0,1 y 1 segundos y están compuestos principalmente por ondas Rayleigh y S.

3.4 MÉTODOS PASIVOS

Los métodos pasivos se basan en la medición de vibraciones ambientales. Las vibraciones con una frecuencia superior a 1 Hz tienen su origen en la actividad humana (tráfico, maquinaria, etc.) y se conocen como microtemblores (Bonney-Claudet et al., 2008). Por otro lado, las vibraciones de menor frecuencia, están asociadas a una fuente natural, como el oleaje, ciclones o corrientes de viento y son conocidas como microsismos. El supuesto fundamental de los métodos pasivos es considerar las vibraciones ambientales como una superposición de ondas superficiales que se propagan con una distribución aleatoria uniformemente distribuida en todas las direcciones (Arai & Tokimatsu, 2004). Uno de los métodos más usados en la actualidad se basa en la relación espectral H/V expuesta por Nakamura (1989), el cual permite estimar espesores sedimentarios a partir de la frecuencia de resonancia del sitio.

3.4.1 Método de Nakamura

El método de Nakamura (Nakamura, 1989) es uno de los métodos más utilizados en el análisis de registros de vibración ambiental (ecuación 1) ya que sólo requiere de registros en una sola estación y proporciona información sobre la frecuencia fundamental del sitio, pero no sobre la amplificación asociada a ésta. Este método se basa en que la frecuencia de vibración del suelo sufre fluctuaciones que varían de acuerdo al origen de las vibraciones que se generen alrededor del punto de medición. Es decir, las vibraciones provenientes de fuentes artificiales pueden ser consideradas como ruido a fin de estimar las características dinámicas de las capas superficiales refiriéndose a microtemores, ya que en su mayoría poseen movimiento en dirección vertical y tienden a inducir ondas Rayleigh.

$$S_{TT} = SH_s / SV_s \quad (\text{Ecuación 1})$$

SHS: componente horizontal del temor en la superficie.

SVS: componente vertical del temor en la superficie.

Siguiendo la metodología utilizada por Nakamura (1989), la pseudo-función de transferencia de las capas superficiales se puede definir como el cociente (ecuación 1). Se supone que la componente vertical del temor refleja el efecto de las fuentes locales, que no es amplificado por las capas superficiales (ecuación 2) y que el efecto de las ondas Rayleigh (ES) puede ser estimado por el cociente.

$$ES = SV_s / SV_B \quad (\text{Ecuación 2})$$

SVS: componente vertical del temor en la superficie.

SVB: componente vertical del temor en el substrato.

Si $ES = 1$, no existe contribución de ondas Rayleigh; y si ES mayor que 1, el efecto de las ondas Rayleigh también es mayor (ecuación 2).

Por lo tanto, la técnica de Nakamura muestra que a partir de la relación de cocientes espectrales entre la componente vertical y la componente horizontal de un mismo punto se puede obtener una estimación del efecto de sitio en capas superficiales con el objetivo de mitigar el riesgo sísmico o bien, estudiar la geometría de cuencas mucho más profundas si se modifican los parámetros de adquisición y procesamiento.

3.5 EFECTO DE SITIO

El efecto de sitio es una característica dinámica representativa de los suelos sedimentarios blandos y profundos (Field et al., 1995), mediante la cual se origina una resonancia que tiende a aumentar las señales sísmicas de períodos determinados según el tipo de suelo (Lachet et al., 1996); pero la señal amplificada puede originarse de cualquier fuente, no sólo las sísmicas (Bonilla et al., 1997), lo cual sirve de base a los procedimientos de caracterización del suelo en las centros poblados y poblaciones para la obtención de sus propiedades dinámicas (espesor de sedimento, velocidades de onda S, densidad, entre otras) usando mediciones de ruido ambiental.

El viaje de las ondas sísmicas refractadas por la corteza profunda va desde las rocas consolidadas, a kilómetros de profundidad, a la poca cohesión y consistencia de la corteza somera o suelo sedimentario. Es así como las condiciones de la estructura cortical somera que definen el suelo limitan el llamado efecto de sitio, pudiendo variar respecto a la ubicación del punto de medición.

Consecuencia de esto ha sido el estudio del efecto de sitio, el cual en un principio requería las técnicas convencionales, SPT y refracción sísmica, y en la actualidad se basa en técnicas con aspectos más vinculados a fenómenos de resonancias, los cuales se relacionan con las curvas de respuestas, con las frecuencias o los periodos predominantes y fundamentales.

Las técnicas geofísicas tradicionales no fueron diseñadas para obtener el efecto de sitio directamente, sino para determinar características geotécnicas y geofísicas tales como velocidades de fases, tanto de P (onda primaria) como de S (onda secundaria), espesores

sedimentarios y algunos parámetros como la rigidez y la densidad, entre otros. El efecto es calculado a partir de estos resultados. Así se obtiene un modelo estratigráfico, y posteriormente una curva de respuesta del suelo arrojando el efecto de sitio.

Las técnicas modernas determinan directamente el efecto de sitio a partir de dos interpretaciones físicas del fenómeno, que en la actualidad no son excluyentes, sino complementarias. La primera de ellas está basada en la multi-reflexión de onda S entre la superficie y el basamento (Nakamura, 1989) y la segunda, se fundamenta en patrones de dispersión de onda Rayleigh en medios estratificados (Arai y Tokimatsu, 2004). La tesis de Nakamura ha sido puesta en duda por varios investigadores, como Kudo (1995), quien considera que las hipótesis sobre la posibilidad de la simplificación de las contribuciones de las ondas Rayleigh (ondas superficiales) son débiles así que la curva H/V no sería, necesariamente, la curva de respuesta del suelo (Bonive, 2009).

3.6 ESTIMACIÓN DE ESPESORES SEDIMENTARIOS

Kramer (1996), estableció una fórmula (ecuación 3) para determinar el espesor sedimentario a partir de la frecuencia de resonancia, cuya ecuación es la siguiente:

$$T_0 = \frac{4H}{V_s} \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde T_0 es el período fundamental de la estación, V_s es la velocidad de onda de corte y H es el espesor sedimentario, de este modo es posible calcular el espesor según el periodo de resonancia del sitio.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

4.1 METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN

Esta investigación fue realizada a partir del cumplimiento de fases establecidas para alcanzar los objetivos planteados de manera ordenada.

Primera fase. Revisión bibliográfica

En esta etapa se recopiló información geológica, geofísica, cartográfica y gravimétrica de estudios previos realizados en la zona de estudio, se procedió también a la revisión de artículos y tesis relacionados con ruido sísmico ambiental, cálculo de períodos fundamentales y microtemores.

Segunda fase. Planificación pre-campo

En esta fase se organizó todo lo referente a la salida de campo, cumpliendo un cronograma donde se estableció la fecha de salida, duración de la adquisición, arreglo a efectuarse, cantidad de estaciones, limitación de la zona de estudio y objetivos a cumplir.

Para este caso, la zona de estudio, se ubicó en el estado Barinas, se determinaron un total de 60 estaciones de adquisición, generando un pre-plot a partir del uso del programa ArcGis a fin de generar perfiles ubicados en zonas con vías de acceso, la separación promedio entre estaciones fue de 5 km, y perpendiculares a la cordillera Andina a fin de analizar la variación lateral de la cuenca.

Tercera fase. Adquisición

La adquisición de datos registró un total de 60 estaciones con un alcance diario de medición de 8 estaciones aproximadamente, para un total de 7 días de campo. Fueron utilizados diversos equipos, los cuales serán descritos a detalle en este capítulo, tomando en cuenta las

características propias del mismo, los parámetros de la adquisición y las modificaciones pertinentes realizadas, basadas en condiciones climáticas, locales o de cualquier índole que generaron alguna variación en la medición de la señal.

- Equipo de registro sísmico
- Sismómetro
- GPS
- Antena

Equipo de registro sísmico REF-TEK 130B

Es un registrador sísmico portátil de banda ancha con un rango dinámico mayor a 138 dB, su función es digitalizar registros sísmicos de diferentes sensores externos tales como sismómetros, acelerómetros, entre otros. Cuenta con 32 GB de memoria, distribuida en dos unidades extraíbles de 16 GB cada una. (figura 18). 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 18. Registrador sísmico REF TEK 130B (www.reftek.com).

Sismometro *Observer* modelo 151-30

Es un sensor de retroalimentación de banda ancha de frecuencia de 0.033 Hz - 50 Hz, capaz de medir amplias gamas de frecuencia de movimiento, desde ruido de fondo local hasta fuertes vibraciones (figura 19). Contiene tres sensores independientes (uno vertical y dos horizontales) con una función de circuito de realimentación electrónica, control y circuitos de conversión de potencia, bajo ruido, amplio rango dinámico y de fácil instalación y uso. El mecanismo de nivelación incluye dos niveles de burbuja, tres tornillos ajustables y tres tuercas de seguridad que se encuentran en la parte inferior del sismómetro.



Figura 19 Sismometro *Observer* modelo 151-30 (www.reftek.com).

GPS GARMIN modelo 60CSx

Es un receptor GPS de alta sensibilidad de excelente recepción de satélites, con altímetro barométrico de alta precisión, una brújula electrónica y carcasa resistente al agua, mapa atlántico base y pantalla a color. (figura 20). Permite establecer la ubicación exacta de cada estación de adquisición de datos.



Figura 20. GPS Garmin modelo 60CSx (www.garmin.com)

Para la adquisición también se requirió el uso de:

- Batería de 12 v
- Libreta de campo
- Vehículo 4x4
- Mapa de ubicación de estaciones

Parámetros de adquisición

Tiempo de grabación: 40 minutos

Frecuencia de muestreo: 200 Hz

Espaciamiento entre estaciones: 5 km aproximadamente

Metodología de medición en campo

Antes de comenzar la adquisición, es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones tomadas del proyecto SESAME (2004) para la aplicación de la técnica de relación espectral H/V sobre vibraciones ambientales:

- 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.
- Evitar colocar el sensor sobre suelos saturados de agua, por ejemplo, después de una fuerte lluvia.
- 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.
- 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.

Luego de tomar en cuenta estas indicaciones, se procede a adquirir los datos en la estación, donde:

- Se ubica con el GPS la estación a medir en el área de estudio.
- El sensor debe ser colocado a una distancia aproximada de 5 m del digitalizador, para evitar ruido electrónico.
- Se verifica la horizontalidad del sensor con una burbuja de precisión, enroscando los tornillos de nivelación hasta que se nivele la burbuja, luego se vuelve a apretar la tuerca de seguridad para bloquear las masas
- Se coloca el GPS en un área estable, y se conecta a la entrada *GPS* del registrador.
- Se orienta el norte usando el sensor con el norte geográfico. Se conecta el cable a la respectiva entrada del sensor y en el digitalizador.
- Se enciende el equipo de control y se verifica que tenga instalado el programa REFTEK IFSC, se conecta al digitalizador en la entrada correspondiente.

- Se liberan las masas del sensor, usando la llave que se encuentra en la caja que transporta el mismo, girar de *LOCK* a *UNLOCK* (el sensor no puede ser movido o tocado mientras las masas estén libres)
- Se conecta el cable de poder, y al encender la pantalla del digitalizador, se verifican los parámetros de grabación.
- Se verifica que los tres canales estén funcionando correctamente, en caso de que no sea así, debe esperarse unos minutos que el sensor se estabilice y se verifica nuevamente
- Para empezar la grabación, se selecciona la opción ON en la opción Control-Status
- Se anota en la libreta de campo la hora exacta de inicio de grabación, día juliano, nombre del archivo, número de estación y cualquier observación que pueda generar variaciones en la medición.
- Al finalizar el proceso de grabación se debe evitar el tránsito de los equipos, a fin de garantizar la menor afectación de ruido local en los datos.
- Finalizado el proceso de grabación, se pulsara la opción *OFF*, se reporta la hora y se desconecta la corriente, luego se bloquean las masas del sensor, y se continúa con el desmontaje del equipo, para seguir a la próxima estación.

4.2 METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO

Luego de la adquisición se procede a realizar una serie de pasos para procesar los datos brutos, aplicando todos los parámetros y algoritmos necesarios, se inicia con:

Descarga de datos al procesador y conversión

En primera instancia, al finalizar la adquisición de datos, se retiran las memorias del digitalizador REFTEK, y se descargan los datos al ordenador. Estos automáticamente están ubicados en carpetas enumeradas con su año y día juliano, tal como lo muestra la figura 21.

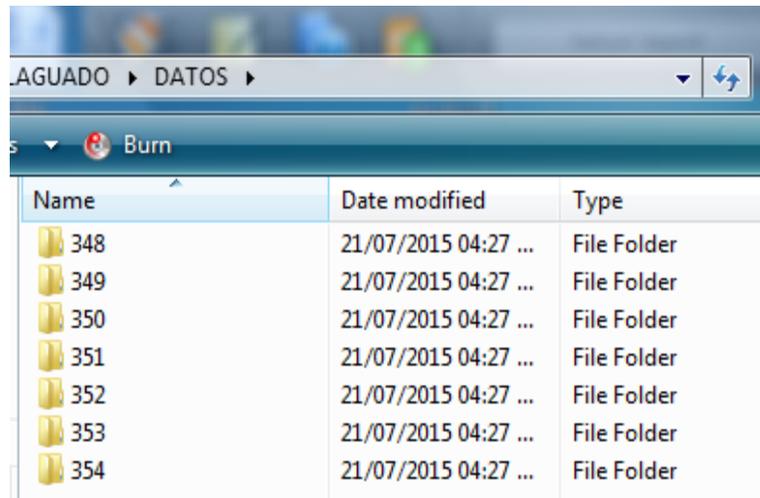


Figura 21. Carpetas de datos originales extraídos de memorias externas del registrador.

Se verifica posteriormente con el software RT View que la grabación haya sido efectiva para las tres componentes.

Transformación de datos a archivos .saf

Los archivos vienen en un formato no compatible con Geopsy, por tanto utilizando una rutina del tutorial creada por el Ing. Victor Rocabado (2012) denominada “Uso del Equipo REFTEK-130 para estudios de ruido ambiental” (figura 22)

- Se procede a copiar las carpetas correspondientes a los días julianos de grabación y pegarlos en la carpeta *Archive* ubicada en `c:\reftek\archive`.
- Se crea un archivo .txt que incluya las horas de registro para cada una de las estaciones, correspondientes al día juliano de adquisición y otro con el nombre de las estaciones, tal como se muestra en la siguiente figura:

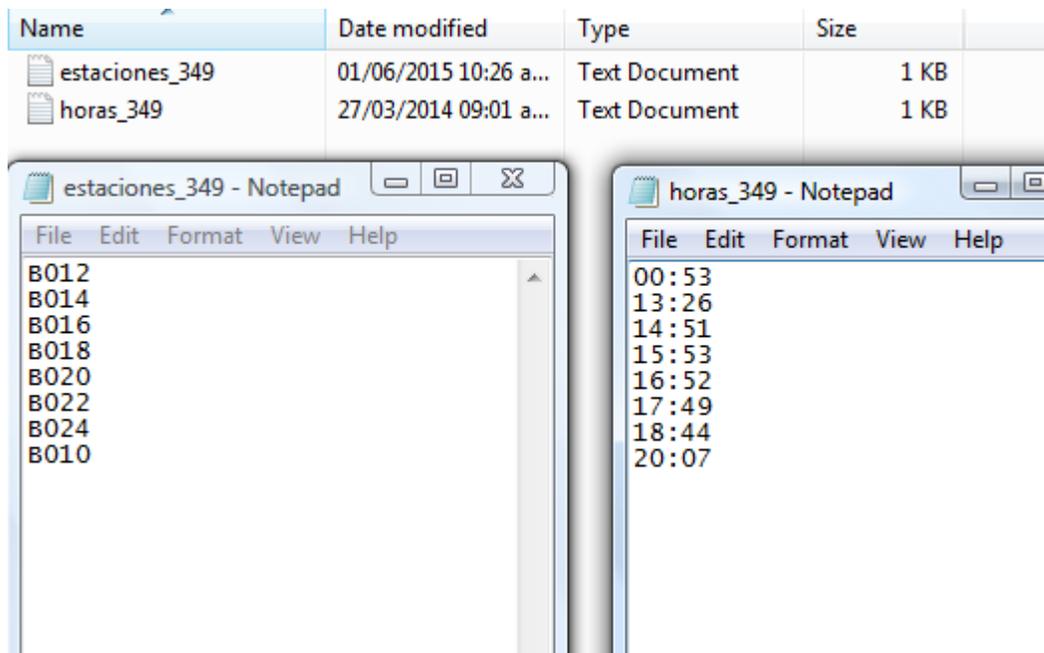


Figura 22. Hojas de textos relacionadas a estaciones y horas del día juliano 349.

Se ejecutan las rutinas denominadas 1-arcfetch.vi, 2-rtcnvrt.vi, 3-movedata.vi y 4-Ref2Saf.vi.en el orden establecido.

Al ingresar a la primera rutina “*1-arcfetch.vi*”, se debe completar la información solicitada correspondiente al número de estaciones a procesar, año, día juliano y duración de medición.

Arcfetch.vi
Elaborado por: Victor Rocabado
Febrero 2011

Esta rutina permite crear un archivo por lotes (.bat)
para extraer los datos de campo en formato RT

Ubicación archivo:

Número de estaciones a procesar:

Año: Ingrese solo los dos últimos dígitos

Día Juliano:

Duración (min):

Figura 23. Rutina 1- Arcfetch, Labview, Rocabado (2012)

Posteriormente, se aplica la rutina “**2-rtcvrt.vi**”, la cual permitirá exportar los datos actuales a formato ASCII (figura 24). Se deben seguir los pasos que indica para encontrar el directorio y generar un archivo .dat, tomando los archivos .RT generados en la rutina previa.

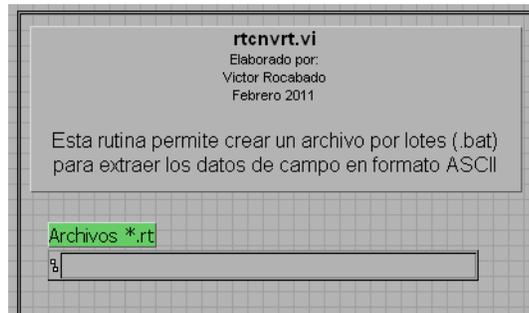


Figura 24. Rutina 2-Rtcvrt Labview, Rocabado (2012)

Más adelante, se abre la tercera rutina “**3-movedata.vi**” en el cual se debe indicar el número del canal a procesar (1, 2 o 3) como se muestra en la figura 25; cuando se ejecuta la rutina, se debe introducir la ubicación de los datos en formato .dat, el canal a procesar y la ubicación de la carpeta de destino, la cual debe tener como nombre el número del canal que se está procesando, ejecutándose la rutina para cada uno de los canales.

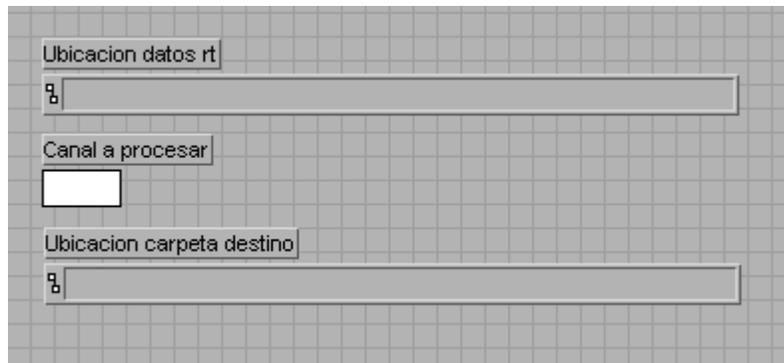


Figura 25. Rutina 3-Movedata, Rocabado (2012)

Se procede entonces a ejecutar el ultimo comando “4-Ref2Saf.vi” (figura 26), dando como resultado la conversión de datos en formato ASCII a SAF, ingresando la duración en minutos de la estación, la frecuencia de muestreo y el tipo de sensor, también la ubicación del archivo .txt que contiene los nombres de las estaciones de determinado día de medición. En las próximas ventanas pregunta la ubicación de los datos ASCII correspondientes a los canales 1, 2 y 3.



Figura 26. Rutina 4-Ref2Saf, Labview, Rocabado 2012

Procesamiento de la señal para la obtención de la relación espectral H/V

Al abrir el programa, se ingresa en el ícono *import signals* y luego en *file* para cargar la señal correspondiente a la estación a procesar, desplegándose la señal en sus tres componentes, tal como se muestra en la figura 27.

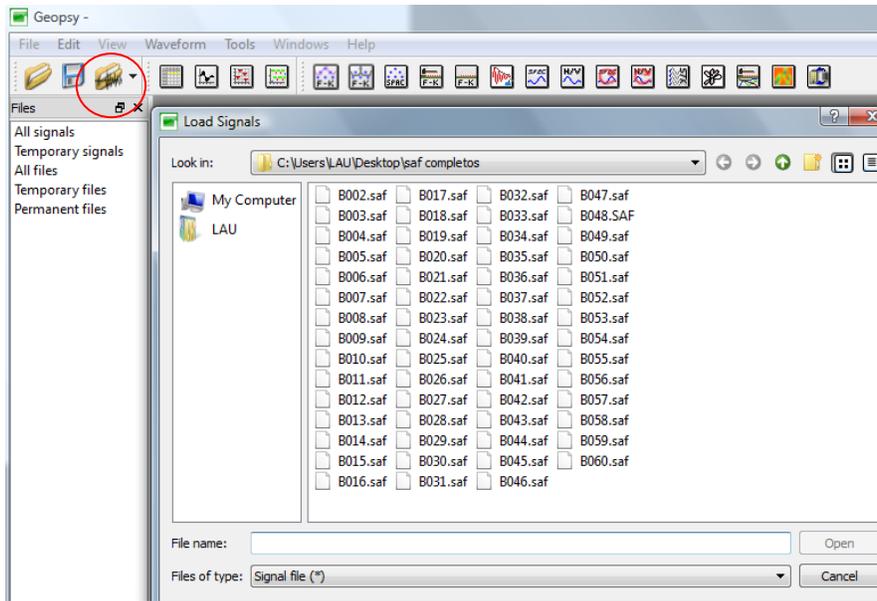


Figura 27. Ventana para importar señal en Geopsy

El primer paso consiste en eliminar el valor de desplazamiento de la señal, esto se realiza a través del menú *waveform* > *subtract value*. Posteriormente se selecciona 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, tal como se muestra en la figura 28.

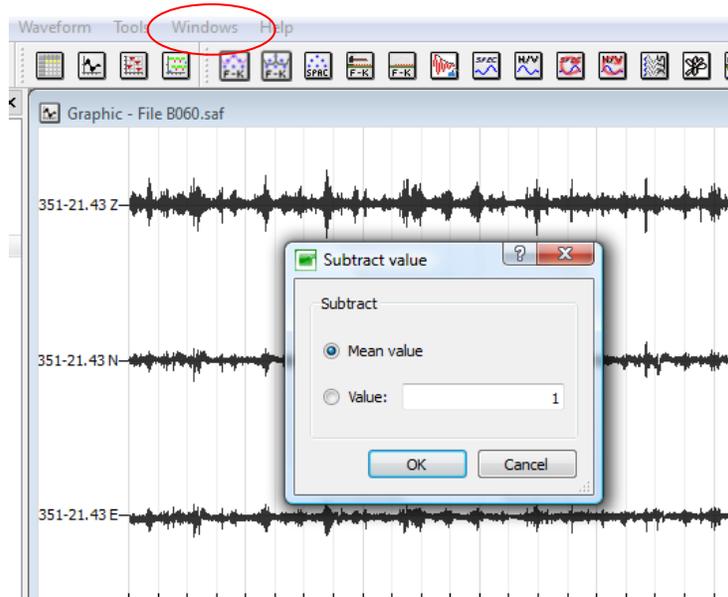


Figura 28. Ventana *subtract value* en Geopsy.

El próximo paso es aplicar filtros para depurar la señal y obtener una señal filtrada en la frecuencia que se requiere, en este caso se aplicó un filtro Butterworth pasa banda con frecuencias de paso entre 0,08 y 15 Hz. Para ello se ingresa en el menú *waveform > filter*, se abre una ventana de diálogo *Frecuency filter* (figura 29), en la cual se debe introducir el tipo de filtro que se desea aplicar y la frecuencia de corte para dicho filtro, la cual dependerá del objetivo de estudio que se procura estimar.

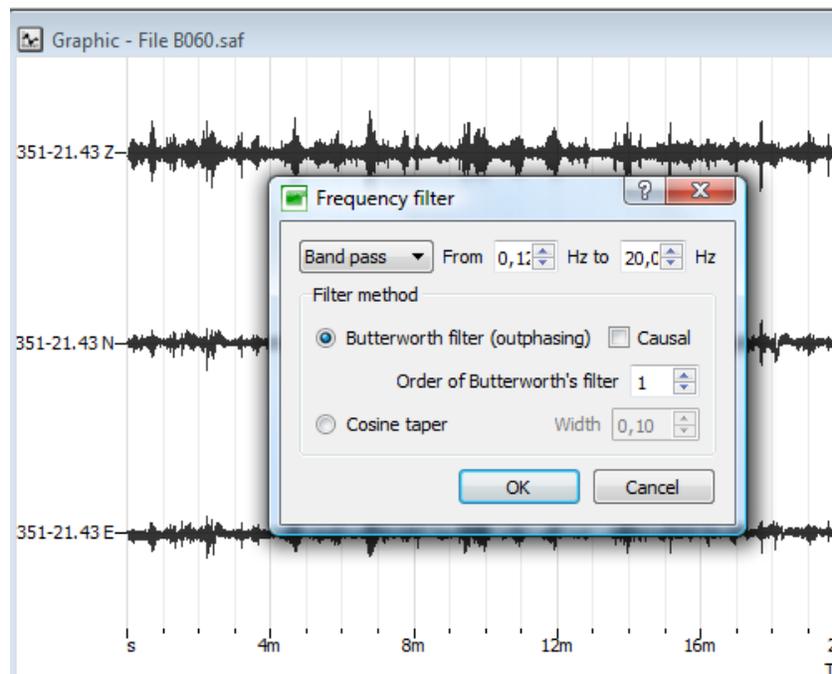


Figura 29. Ventana de filtros de señal en Geopsy

Más adelante, se procede a aplicar ganancia a la señal en la opción **AGC** (control automático de ganancia) (figura 30), esta opción modifica la amplitud de las señales, usando el ancho de ventana escogido como longitud de ventana en movimiento, en segundos, calculando el valor promedio y dividiendo la amplitud del punto actual por el valor promedio. En este caso se aplicó un ancho de ventana de 3 segundos.

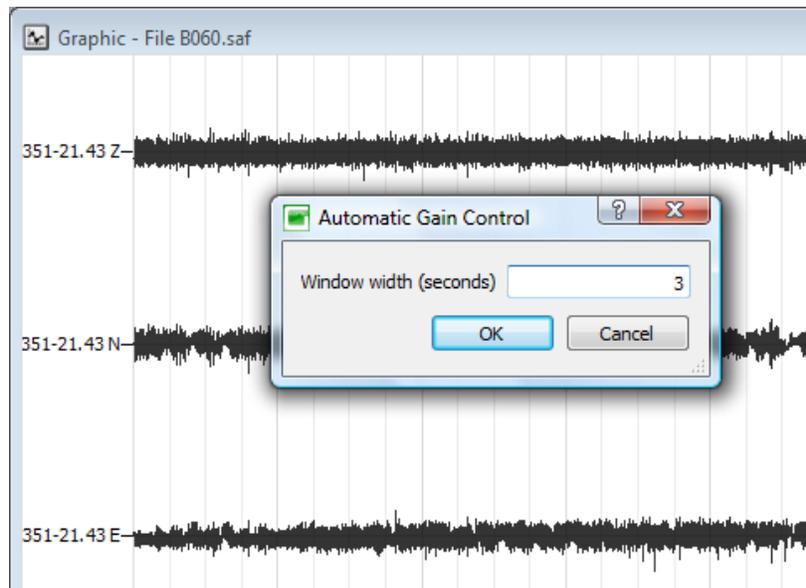


Figura 30. Control automático de ganancia para señal en Geopsy.

La relación espectral H/V se aplica por medio del logo correspondiente, ubicado en la barra superior, donde luego aparecerá una ventana donde debemos introducir los parámetros de procesamiento (figura 31)

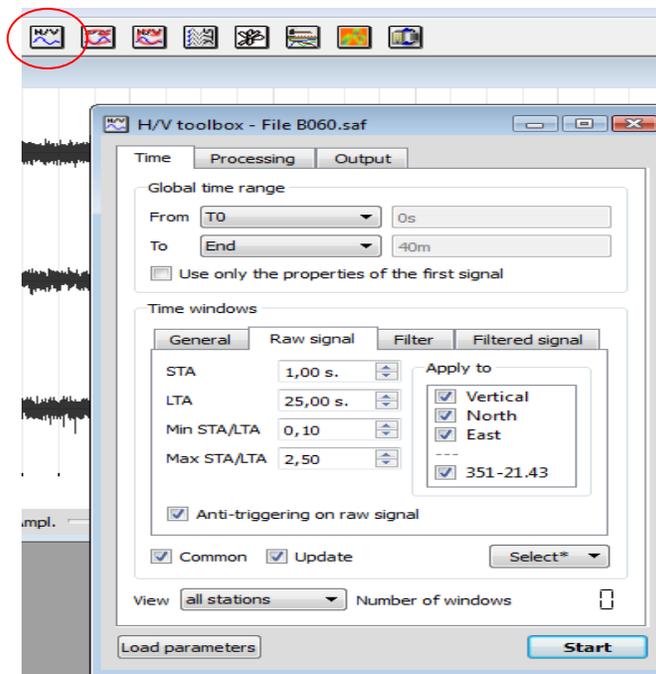


Figura 31. Ventana de relación H/V en Geopsy.

Esta ventana está dividida en 3 secciones: *Time*, *Processing* y *Output*, inicialmente se introducen los parámetros en la primera ventana. En la pestaña *Global time range*, se selecciona la parte de la señal a procesar, en este caso, se selecciona completa, de 0 a 40 minutos.

La ventana *Time* se subdivide en cuatro sub-ventanas y permite establecer criterios de selección de las ventanas, usamos la opción *Length* para delimitar la longitud de la ventana, puede venir dada por la duración exacta de tiempo o entre un rango de segundos, se utilizó la opción *Exactly*. Se estableció un parámetro entre 90-120 segundos de longitud de la ventana. Se seleccionó un *Overlap* de 30%, esto permite que ventanas sucesivas o contiguas se solapen, generando superposición (figura 32). 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, aplicando en cada muestra lo largo de la señal, según los parámetros introducidos en la sub pestaña *Raw signal*.

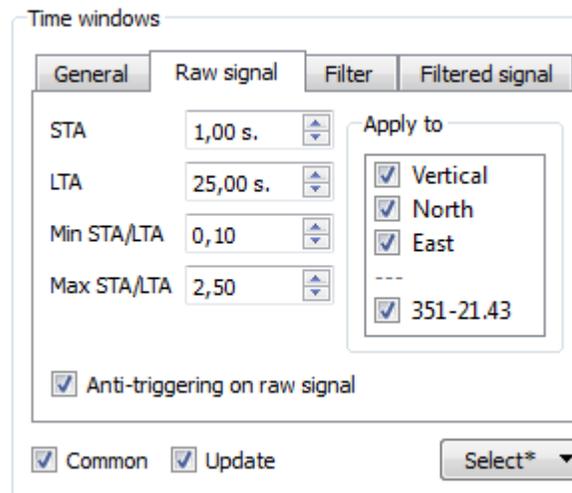


Figura 32. Ventana *time* en Geopsy

Luego en la segunda sub pestaña denominada *Raw signal*, aparecen los valores STA y LTA, estos corresponden a la amplitud de corto plazo promedio *STA* (*Short Term Average*), que es la amplitud de la señal en un periodo corto de tiempo (típicamente entre 0.5 y 2.0 segundos) y el la amplitud promedio en un periodo largo de tiempo *LTA* (*Long Term Average*) que es la amplitud de la señal en un periodo de tiempo mayor (típicamente entre

20 y 60 segundos) (figura 33). Mientras la relación STA/LTA sea menor que *Max STA/LTA* se evidencia la presencia de un ruido estacionario. Este algoritmo se utiliza para procesar las señales únicamente en ventanas de tiempo estacionarias. Cabe destacar, que estos parámetros aunque tienen un valor predeterminado, los mismos deben ser ajustados acorde al contenido de ruido de la señal. *Number of windows* corresponde al número de ventanas seleccionadas de manera automática, de acuerdo a los parámetros introducidos en el menú anterior. En esta opción también podemos agregar o eliminar ventanas de forma manual, de acuerdo a nuestra preferencia.

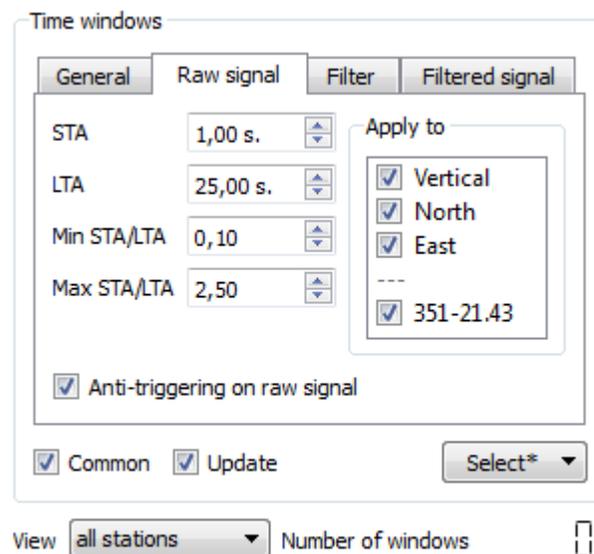


Figura 33. Ventana *raw signal* en Geopsy

Los valores correspondientes a las pestañas *Filter* y *Filtered signal* no sufrieron modificaciones, se mantienen los valores predeterminados.

En la segunda sub-ventana denominada *Processing* se establecen los parámetros relacionados a las componentes horizontales y al suavizado. (figura 34) Para la función *Smoothing*, se utilizó el método *Konno & Ohmachi* usando *Cosine Taper*, un ancho de banda constante en una escala logarítmica y una constante de 20% a 35%, según la señal. Esto con el fin de eliminar los picos transitorios y suavizar el espectro.

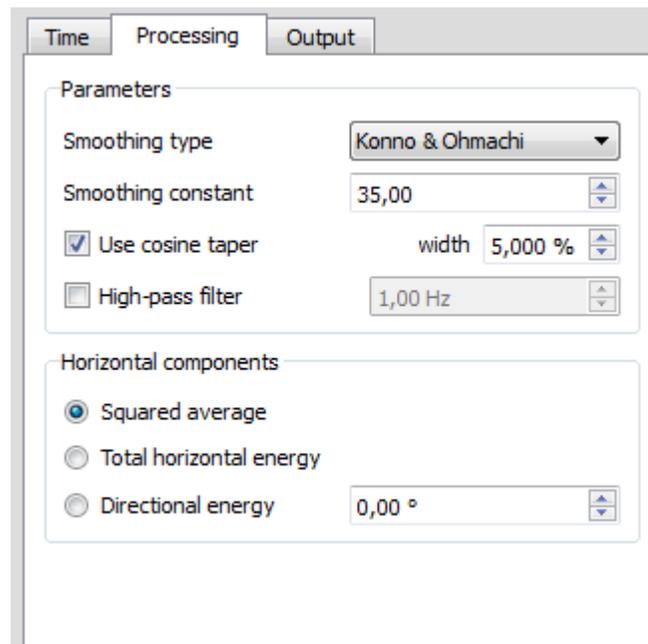


Figura 34. Ventana *Processing* en Geopsy

A continuación, la siguiente sub-ventana llamada *Output* permite fijar los parámetros de salida y guardar los resultados obtenidos, como se muestra en la figura 35:

- El valor *Frequency sampling* fija los parámetros sobre los límites de frecuencia, para este caso se considera desde 0,08 hasta 15 Hz.
- En la sección de *Appearance*, se pueden determinar los parámetros de la apariencia de los gráficos, donde se utilizaron los sugeridos por el programa.
- Seguidamente en la sección de salida *Output* se selecciona el directorio la carpeta donde se desea que se guarde automáticamente el procesamiento, creándose dos archivos de salida: uno de parámetros (.log) y otro de resultado (.hv).

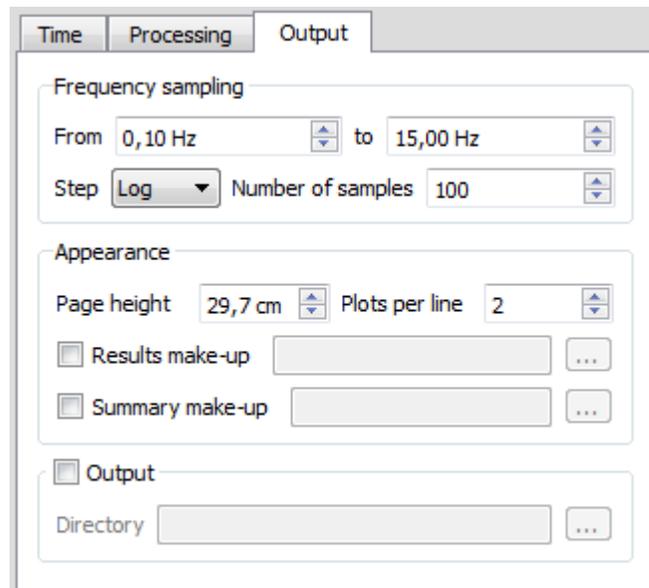


Figura 35. Ventana *Output* en Geopsy

Por último, se hace *click* en el botón *Start*, ubicado en la esquina inferior derecha de la ventana. Posteriormente, las ventanas seleccionadas, se mostrarán en variedad de colores, y se reflejará una curva del mismo color en el gráfico resultante, el cual muestra la relación H/V en el eje de las coordenadas, y el período en el eje de las abscisas.

La curva con mayor amplitud, es decir, donde la relación espectral H/V es mayor, se muestra como un pico predominante correspondiente al período fundamental de vibración del sitio. La curva negra representa la media de todas las curvas H/V, mientras que las dos líneas punteadas corresponden a la desviación estándar.

Estimación de profundidades a partir del cálculo de V_s

Para realizar el cálculo de espesores es importante conocer el período fundamental y la velocidad de onda S correspondiente a cada estación y luego realizar una interpolación para obtener una representación de la capa. Para estimar dichas velocidades, Lowrie (2007) emplea una relación empírica (figura 36) que vincula la velocidad de onda P y S de acuerdo a la densidad para diferentes tipos de rocas.

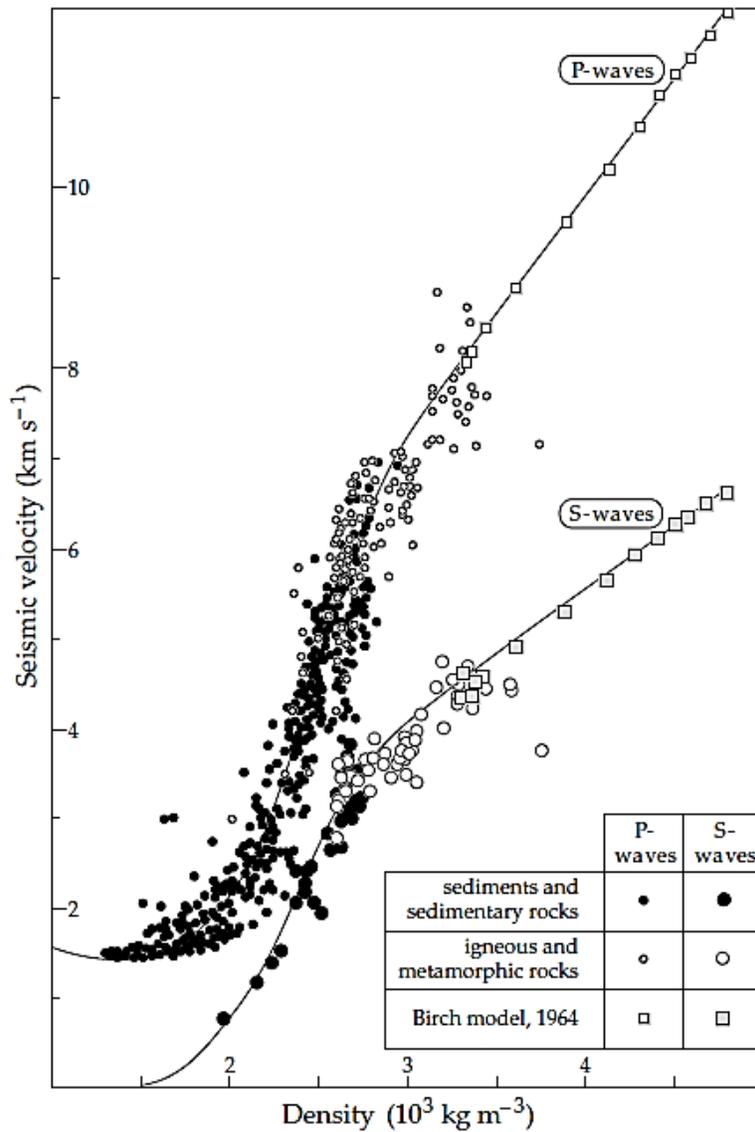


Figura 36. Relación entre velocidad de onda P y S a partir de las densidades. Lowrie (2007)

Por su parte, las relaciones empíricas establecidas por Brocher, T. (2005) a partir de la compilación de varios tipos de roca, y la relación de V_s en función de V_p se definen a través de la siguiente ecuación (ecuación 4) denominada “Ajuste de regresión de Brocher”:

$$V_s \text{ (km/s)} = 0.7858 - 1.2344V_p + 0.7949V_p^2 - 0.1238V_p^3 + 0.0064V_p^4.$$

(Ecuación 4)

Para este caso, y tomando en cuenta la bibliografía referida y los valores que mas se ajustaran al rango de valores tomados en consideración para este estudio, se establece el método de Brocher como parámetro de relación de velocidades para la estimación de espesores, utilizando las establecidas según las diferentes densidades.

A partir de allí se realizó el cálculo de espesores correspondientes a cada pico establecido, a partir de la ecuación 5 propuesta por Kramer, S. (1996)

$$T_0 = \frac{4H}{V_s} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

donde **H** es el espesor del estrato

T₀ es el periodo dominante

V_s es la velocidad de onda de corte.

CAPÍTULO V RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Análisis estadístico

Al finalizar el procesamiento de los datos adquiridos se obtuvieron valores asociados a períodos que corresponden a picos generados a partir la relación espectral H/V y analizados posteriormente con herramientas estadísticas a fin de determinar el comportamiento y distribución de la muestra, y determinar la relación de algunas propiedades con los resultados obtenidos. En este caso, se verificó la tendencia central con un diagrama de caja (Figura 38), se obtuvieron las diferentes clases asociadas a los valores de períodos resultantes dadas por histogramas de frecuencia (Figura 37) y una tabla de valores que contiene los parámetros estadísticos (tabla 2).

En la tabla 1, por su parte, se puede observar un aumento en la desviación estándar la cual representa el grado de dispersión de los datos respecto a la media, en este caso el menor valor se encuentra en el período 1 siendo de 0,24 mientras el mayor en el período 3 con un valor calculado de 1,07, esta característica se relaciona con la variación de la profundidad. Para la primera capa (período 1) la variación es menor, mientras que para la tercera capa (período 3) la desviación es mucho mayor ya que existe un adelgazamiento pronunciado de la misma.

PICOS	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
PERIODO 1	57	0,51	1,89	1,11	0,25
PERIODO 2	57	2,19	3,89	3,18	0,47
PERIODO 3	57	6,31	10,25	8,96	1,07

Tabla 1. Cuadro comparativo basado en la desviación estándar para los diferentes picos.

Se generó un histograma de frecuencias de distribución de los períodos, con un total de 173 datos, los cuales refieren a los diferentes rangos obtenidos en el procesamiento (figura 37). En el eje y, se establece una comparativa a nivel porcentual que manifiesta un patrón de

tendencia multimodal con los valores más altos observados en tres subclases que coinciden con los rangos de períodos asociado a los picos generados en el procesamiento de datos. Al analizar el histograma, se puede apreciar que en el intervalo de períodos entre 1 y 2 s se encuentra el mayor nivel porcentual con un 25%, seguidamente con un 22%, se encuentra el rango entre 3 y 4 s y una tercera sub-población con un 15% entre los 9 y 10 s, siendo estas 3 sub-poblaciones las más significativas. Al identificar estos elementos, se consideran un factor indicador de contraste de litología, y se asocian directamente a los picos observados en cada estación de estudio. Entre 4 y 6 segundos, no se aprecia ningún valor asociado, mientras que el menor nivel porcentual con un 3% pertenece a la sub-población entre 6 y 7 s, esto también puede asociarse a la respuesta generada en las estaciones, cuyo tercer pico fue disminuyendo en cuanto a valores periódicos asociados a la geometría de la cuenca.

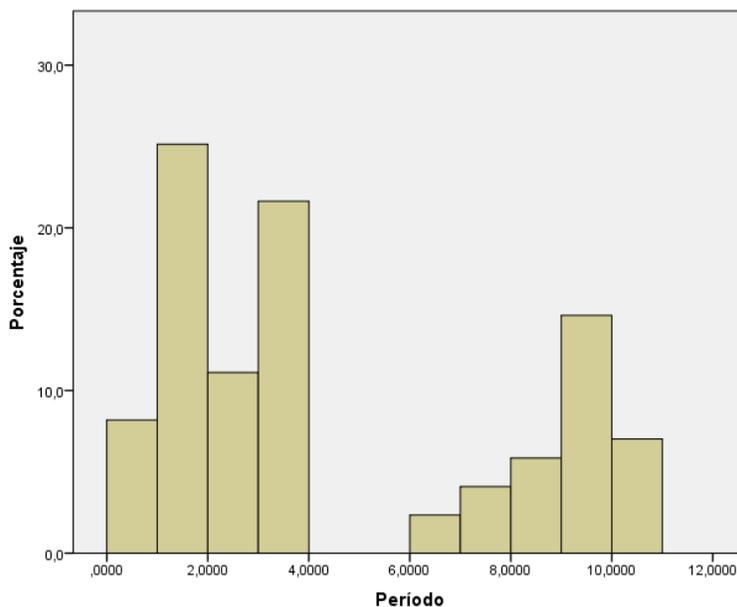


Figura 37. Histograma de distribución de frecuencia general

Por su parte, una tabla con datos estadísticos descriptivos establece la media periódica en 4,41 s, un valor mínimo de 0,51 s y un máximo de 10,25 s. El valor de asimetría es de 0,58, esta medida nos permite identificar si los datos se distribuyen de forma uniforme alrededor

del punto central (media aritmética), en este caso al ser positiva, indica que es asimétricamente positiva por lo que los valores tienden a reunirse más en la parte izquierda que en la derecha de la media. La curtosis corresponde a la elevación o achatamiento de la distribución, comparada con una distribución normal, en este caso se obtuvo una curtosis negativa de -1,3, lo cual indica que la distribución es relativamente plana respecto a una normal, se denomina también platicúrtica. El valor de la varianza es de 11,62 representando dispersión en los datos, esto debido al comportamiento multimodal de los mismos.

Estadísticos generales

	N	173
Media		4,44
Error estándar de la media		0,26
Mediana		3,21
Moda		1,07 ^a
Desviación estándar		3,41
Varianza		11,62
Asimetría		0,58
Error estándar de asimetría		0,19
Curtosis		-1,30
Error estándar de curtosis		0,37
Rango		9,74
Mínimo		0,51
Máximo		10,25

Tabla 2. Análisis estadístico descriptivo general.

La figura 38 muestra un diagrama de caja, las líneas superior e inferior representan el máximo y mínimo de los datos correspondientes a los valores de período adquiridos en la zona de estudio. En este caso fue de 0,51 y 10, 25 s respectivamente. Las medidas del rectángulo viene dadas por el primer y tercer cuartil, mientras que la línea central que lo

divide corresponde a la mediana, que en este caso fue de 3,21; esta gráfica nos muestra que no hay un comportamiento normal en la distribución de los datos.

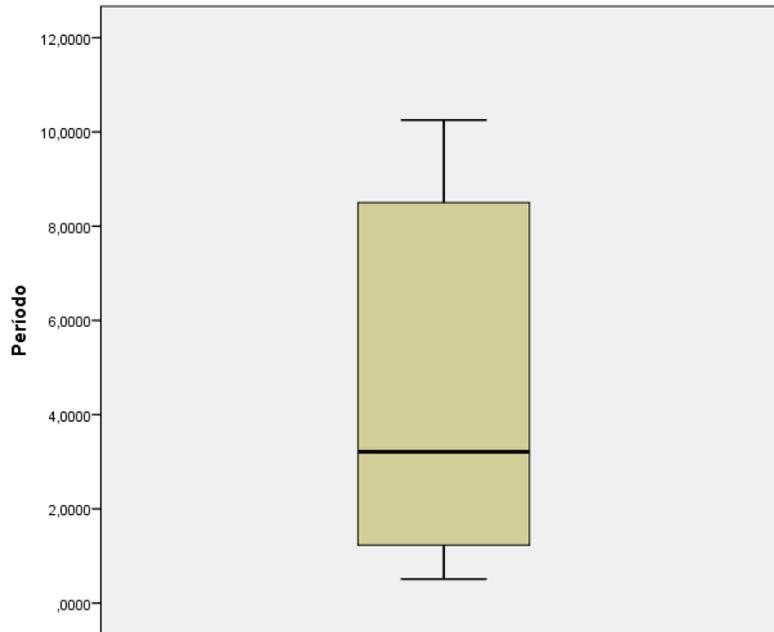


Figura 38. Diagrama de caja general.

Se realizó un análisis estadístico para cada uno de los picos asociados, a fin de determinar algunos valores que explican de modo cualitativo la distribución de los datos y su relación con las respuestas obtenidas.

En primer lugar, se generó una tabla descriptiva para el pico 1 (tabla 3), a partir de un volumen total de 57 datos, dando como resultado, una media de 1,10 s, una asimetría positiva de 0,420 que refiere los mayores valores a la izquierda de la media, valores mínimo y máximo de 0,51 y 1,89 s respectivamente. Así mismo, en el histograma (figura 39), observamos la mayor sub-población con un 26% en el rango entre 1 y 1,1 s, una segunda sub-población con el 22% asociado al rango entre 1,2 y 1,3 s, no se presenta ningún dato en el rango entre 1,4 y 1,6 s, mientras que el rango con menor presencia corresponde entre 0,8 y 0,9 s con un 2%.

Pico 1		
N		57
Media		1,11
Error estándar de la media		0,03
Mediana		1,10
Moda		1,07 ^a
Desviación estándar		0,25
Varianza		0,06
Asimetría		0,42
Error estándar de asimetría		0,32
Curtosis		2,43
Error estándar de curtosis		0,62
Rango		1,38
Mínimo		0,51
Máximo		1,89
Percentiles	25	0,98
	50	1,10
	75	1,22

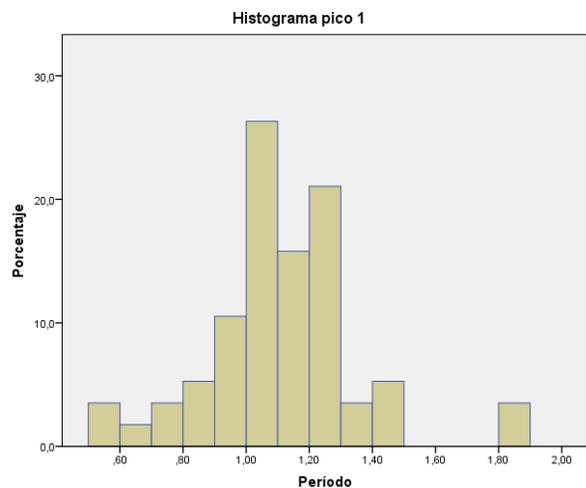


Figura 39. Histograma de distribución frecuencial para el primer pico

Tabla 3. Análisis descriptivo para el primer pico

Así mismo fue aplicado el análisis para el segundo pico como se muestra en la tabla 4, resultando una media de 3,18 s, una varianza de 0,21 y un rango de valor entre 2,19 y 3,89 s, en este caso la asimetría es negativa reportando un valor de -0,45 por lo cual una mayor cantidad de datos se encuentran a la derecha de la media. En el histograma por su parte (figura 40) el mayor rango se establece entre 3,8 y 3,9 s con un 13%, un segundo rango entre 3,3 y 3,4 s con 11%, no presenta valores entre 2,5 y 2,6 s y el mínimo porcentaje lo comparten los rangos 2,3 a 2,5 s, 2,7 a 2,8 s, y 3,6 a 3,7 s con un 2%.

Pico 2	
N	57
Media	3,18
Error estándar de la media	0,06
Mediana	3,21
Moda	2,68 ^a
Desviación estándar	0,46
Varianza	0,21
Asimetría	-0,44
Error estándar de asimetría	0,31
Curtosis	-0,44
Error estándar de curtosis	0,62
Rango	1,69
Mínimo	2,19
Máximo	3,89
Percentiles	
25	2,87
50	3,21
75	3,57

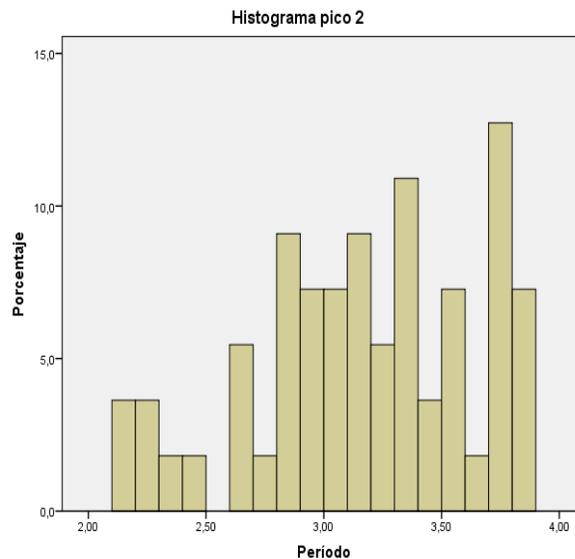


Figura 40. Histograma de distribución frecuencial para el segundo pico

Tabla 4. Análisis descriptivo para el segundo pico

Para el tercer pico, se calculó una media de 8,956686, un mínimo de 6,3054 s y un máximo de 10,25 s, la asimetría para este caso es negativa con valor de -0,823 y una varianza de 1,155 (tabla 5). En este caso el rango de valores es más amplio, y esto justifica la variación en cuanto a profundidad en esta capa. La varianza es de 1,155. El histograma por su parte (figura 41) muestra una sub-población con rango periódico máximo entre 9 y 9,5 s con un 26%, una segunda sub-población con el 22% entre 10 y 10,5 s y un mínimo rango de períodos entre 6 y 6,5 s.

Pico 3		
N		57
Media		8,96
Error estándar de la media		0,14
Mediana		9,19
Moda		10,09
Desviación estándar		1,07
Varianza		1,15
Asimetría		-0,82
Error estándar de asimetría		0,31
Curtosis		-0,23
Error estándar de curtosis		0,62
Rango		3,94
Mínimo		6,30
Máximo		10,25
Percentiles	25	8,29
	50	9,19
	75	9,93

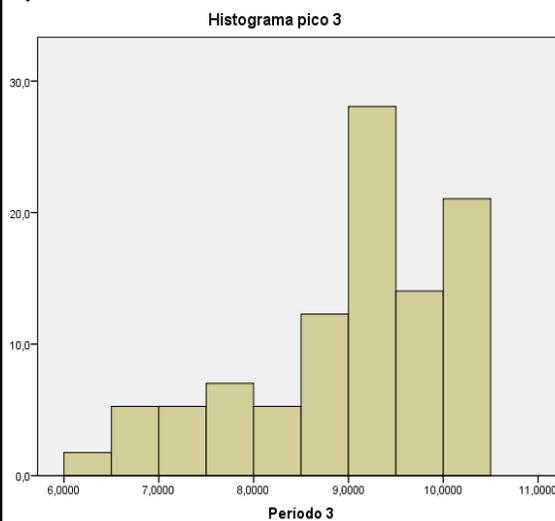


Figura 41. Histograma correspondiente al tercer pico.

Tabla 5. Análisis descriptivo para el tercer pico

Al culminar el análisis por picos, se establecieron algunas diferencias entre ellos, que permiten determinar algunas relaciones según la respuesta obtenida en el procesamiento de los datos, tomando en cuenta la profundidad y la geometría de la cuenca. La varianza, por ejemplo, considerada la medida de dispersión de una variable respecto a su valor medio aumenta considerablemente en relación a los picos, aumentando desde el primero al tercero, esto ocurre porque a mayor profundidad la dispersión de los datos es mayor, esto trae como consecuencia la presencia de curvas poco pronunciadas. Así mismo, la asimetría establece un parámetro positivo en el primer pico, considerando los valores de la izquierda con mayor volumen de datos, asociando esto a la primera capa, donde el espesor es menor a las capas posteriores, cuya asimetría es negativa, distribuyendo mayor cantidad de datos a la derecha.

5.2 RELACIÓN ENTRE LOS PERÍODOS Y COCIENTE ESPECTRAL H/V

A partir del procesamiento de los datos de ruido sísmico ambiental, se obtuvieron los cocientes espectrales, determinando los valores de períodos para cada medición a través del gráfico de relación H/V. Se realizó la selección de las amplitudes más representativas de periodos de la señal, donde los picos más pronunciados representan un alto contraste de impedancia, mientras que los picos menos pronunciados, representan un contraste menor.

El análisis de los espectros de frecuencias correspondientes a cada estación permite determinar la correlación de los picos predominantes con la geometría de la cuenca. Para este caso y basados en el estudio realizado por PDVSA (2014) referente al análisis de facies sísmicas generado a partir del estudio de pozos y tomando en consideración que la zona de estudio se ubica entre los pozos AGL-1X y BEJ-3E (figura 42), se establece una correlación con la estructura generada como resultado del procesamiento de los datos, las relaciones espectrales resultantes se presentan en un gráfico de Excel (figura 43) cuyas componentes provienen de un archivo .hv que genera el programa Geopsy, mostrando un comportamiento similar en cuanto a la tendencia de adelgazamiento de las capas revelando un cambio en el patrón de reflexión de suroeste a noreste.

Al determinar los picos predominantes para cada uno de los perfiles establecidos, se obtuvo que en la mayoría de las estaciones se observaron tres picos definidos y similitud entre estos valores con respecto a la ubicación geográfica de cada perfil.

Existe una estrecha relación entre la forma del pico de período fundamental y el contraste de impedancia acústica, de este modo, se debe tomar en cuenta también la forma que toma el pico en el espectro ya que proporcionará información sobre el contraste de impedancia a profundidad, y permite correlacionar los datos con la geología asociada a esa zona.

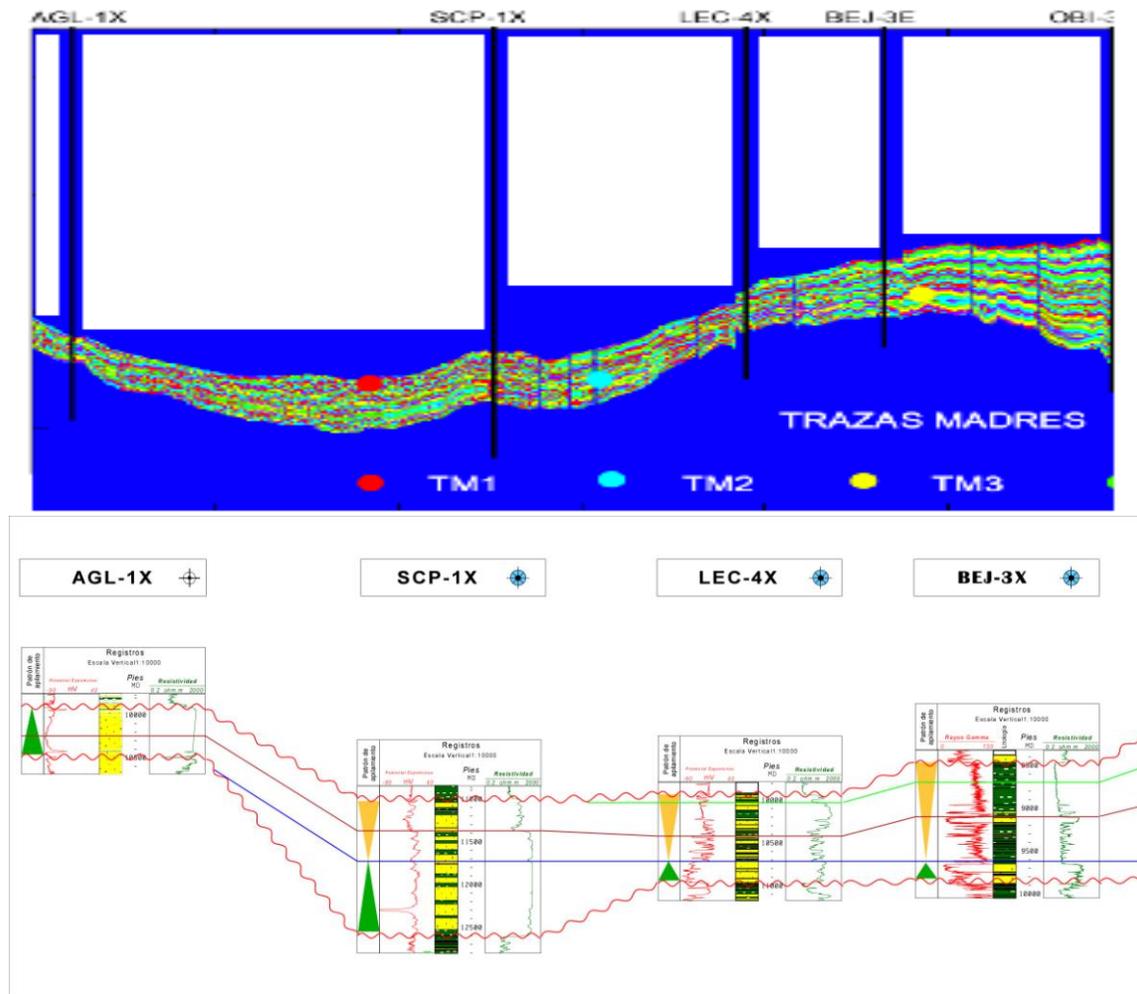


Figura 42. Facies sísmicas. Extraído de PDVSA (2014).

En la figura 43, se muestra la correlación entre las curvas resultantes de la relación espectral H/V de algunas estaciones correspondientes al perfil 1 (paralelo a la cordillera). Además se realizó una tomografía donde establecen los valores de frecuencia y amplitud con la finalidad de analizar la variación vertical y lateral de amplitudes H/V a medida que se profundiza, con valores de amplitud entre 0,6 y 4,2. Como se puede observar en esta zona de la cuenca, la variación lateral no es muy marcada, sin embargo, se produce un adelgazamiento de la tercera capa en dirección NE, registrando menores valores respecto a las que se encuentran hacia el suroeste de la zona de estudio. El método a profundidad sufre

dispersión de las ondas por lo que la respuesta generada se asocia a curvas menos pronunciadas, también puede ser producto de un menor contraste de impedancia acústica entre las capas. En este caso, la segunda capa presenta esa característica, sin embargo, se tomó el valor de mayor amplitud y la tendencia de curvas con mayor cociente espectral.

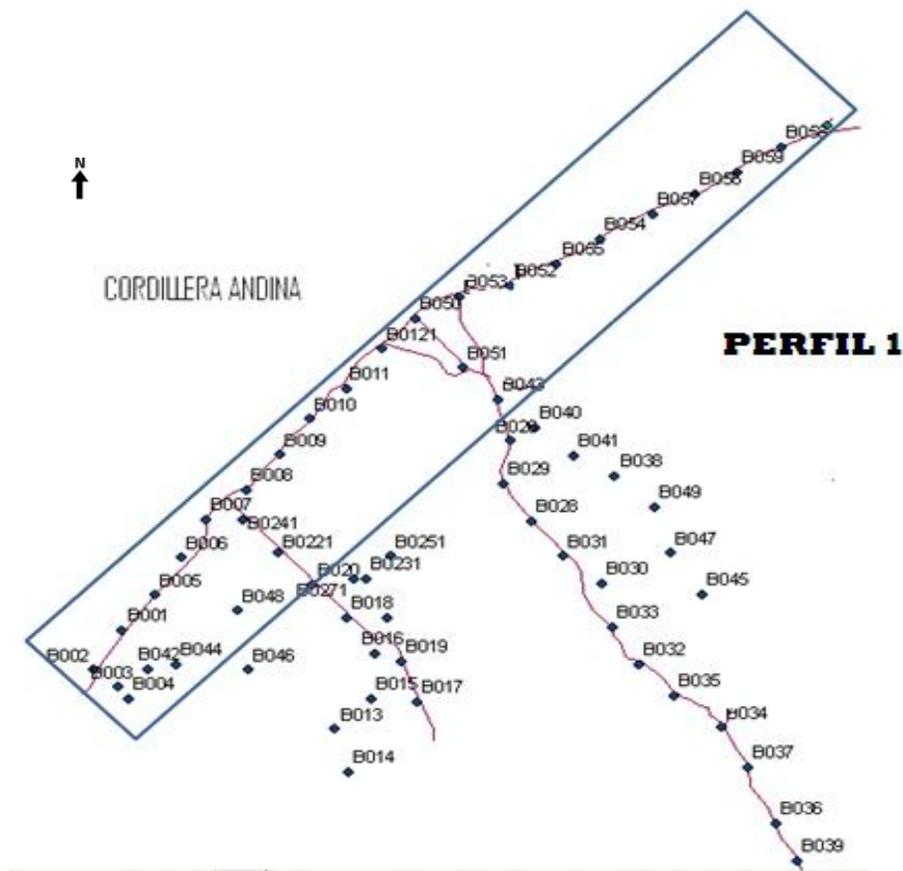


Figura 43. Ubicación de Perfil 1 (Paralelo a la cordillera)

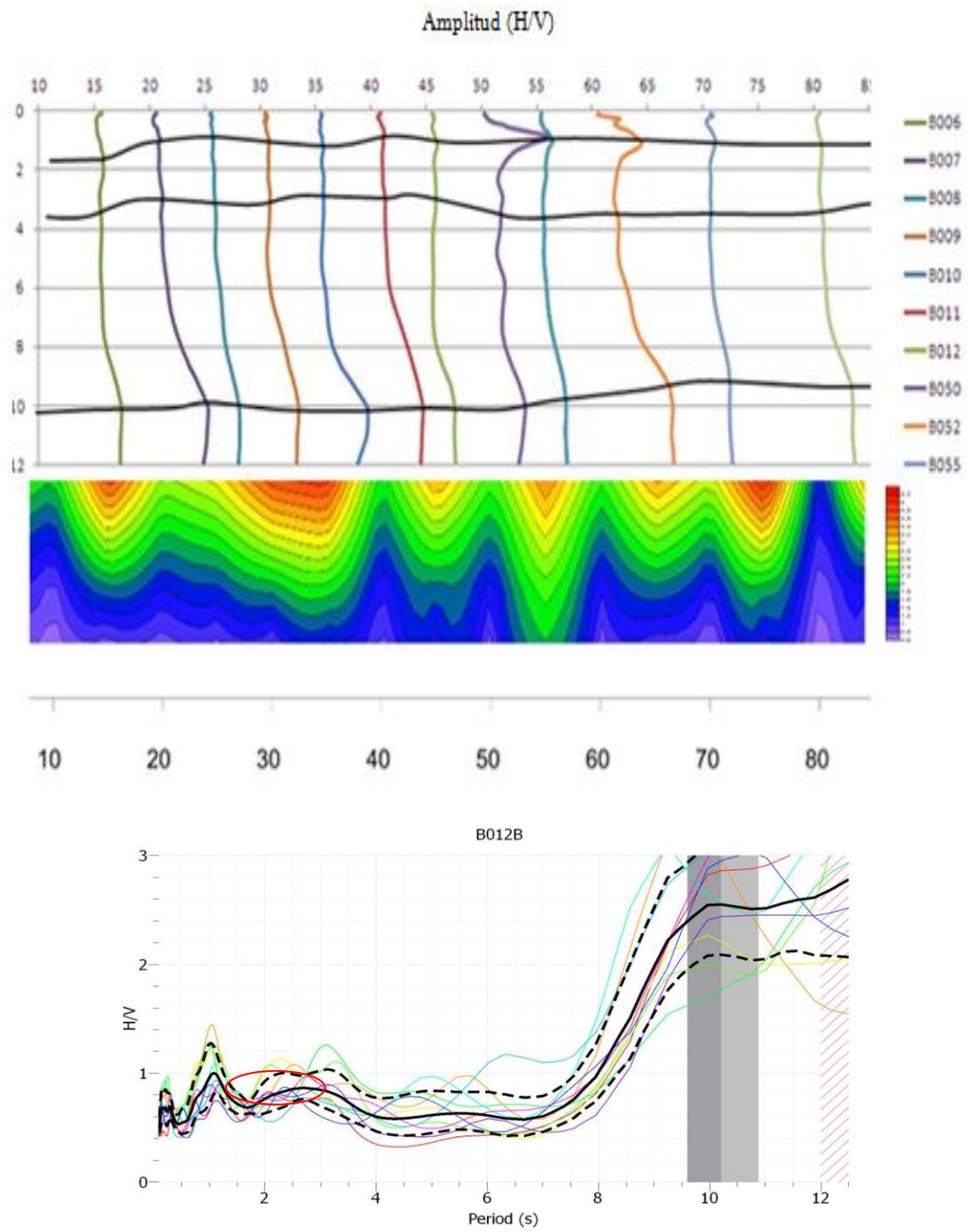


Figura 44. Perfil paralelo a la cordillera de los Andes en relación a tomografía de cociente espectral y picos poco definidos (estación B012)

En el perfil 2 (figura 45), se presentan picos mas pronunciados para el primer y segundo período, la variación lateral no es tomada en cuenta en este caso, dado que los puntos se encuentran ubicados perpendicular a la cordillera, de este modo, la relación viene dada por la geometría de la cuenca siendo mas profunda en la parte más cercana al pie de monte y disminuye al alejarse (figura 46). Este perfil se encuentra ubicado en la zona mas al suroeste del estudio, abarca unos 40 km y presenta picos múltiples en algunas estaciones para la primera capa entre 1 y 3 s aproximadamente, esto responde a los diversos contrastes de litologías en el subsuelo, indicando su posible relación con el contraste entre las formaciones Guanapa y Río Yuca, las cuales presentan litologías variadas que van desde conglomerados hasta sedimentos de grano más fino. En estos casos fue difícil definir el pico significativo, pero se dió prioridad al pico con mayor amplitud.

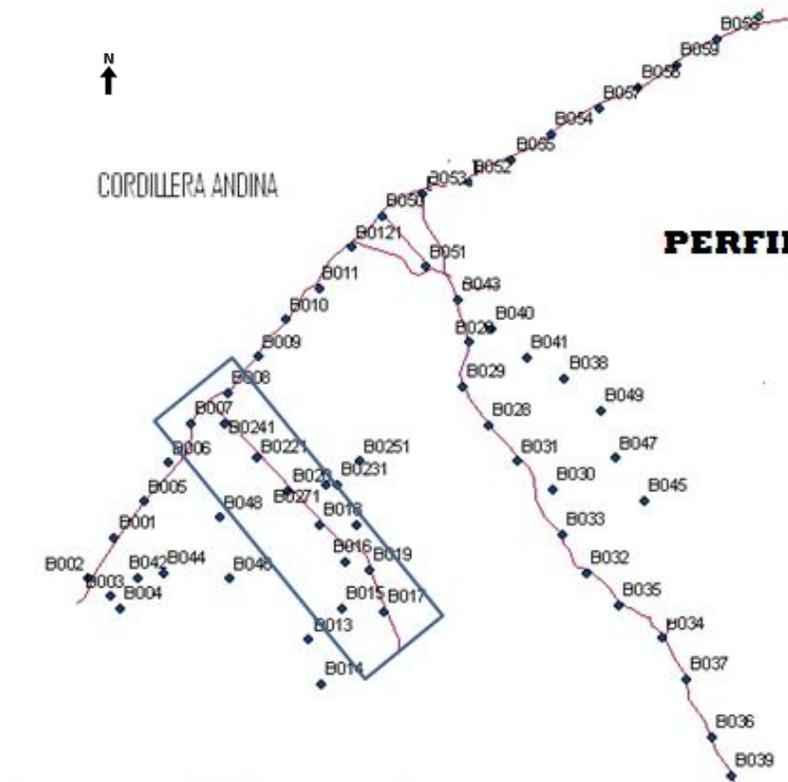


Figura 45. Ubicación de Perfil 2

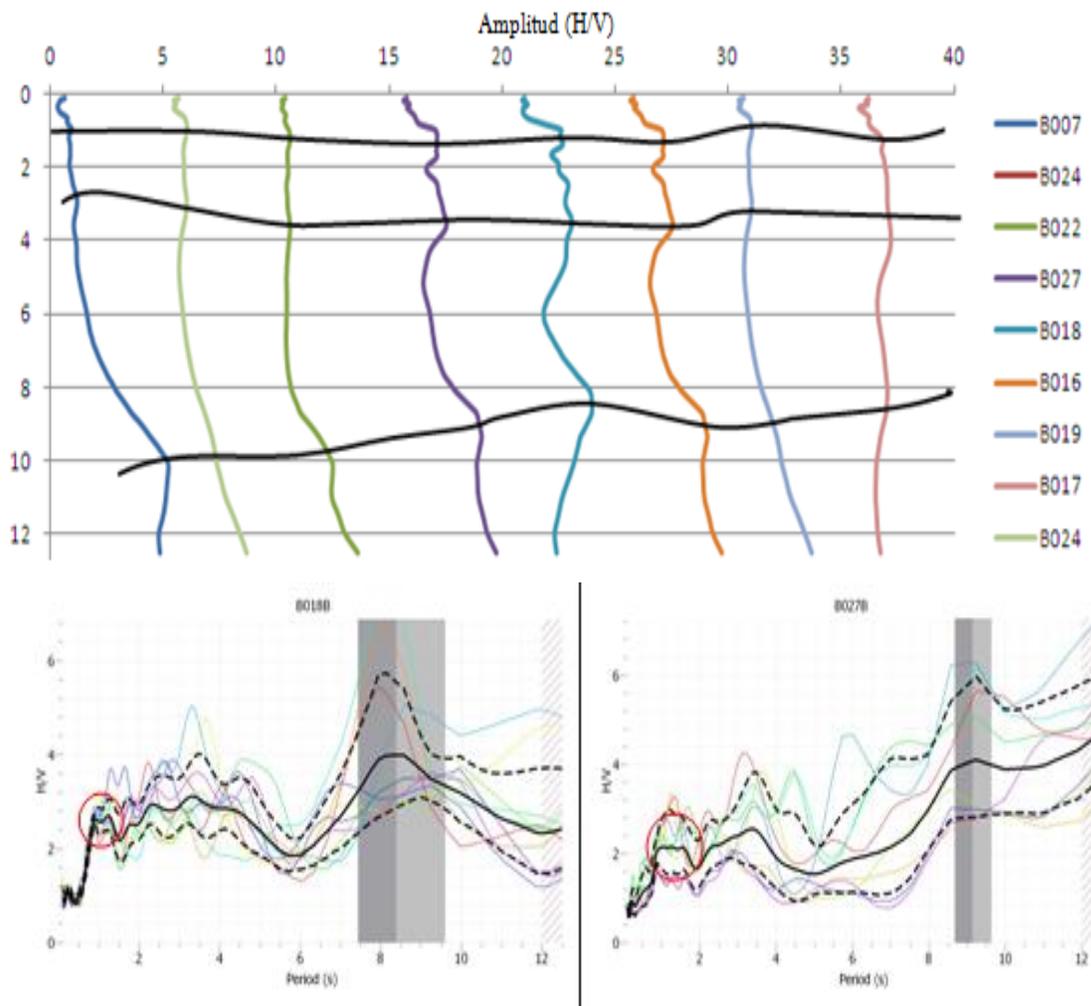


Figura 46. Perfil 2. Relación de picos múltiples (Estaciones B018 y B027)

El tercer perfil (figura 48) abarca unos 80 km en total, la relación espectral establece de manera pronunciada, el adelgazamiento de la tercera capa, esto asociado de manera directa a la geometría de la cuenca, ya que la zona de estudio se encuentra ubicada en el depocentro de la cuenca, por lo cual se observaron profundidades de hasta 4,5 km y una variación importante de esos valores a medida de que las estaciones se alejan de la cordillera. La figura 49, muestra un transecto sísmico a partir de un estudio de pozos, generado por PDVSA (2014) donde se pueden observar distintas estructuras, así como la posible estructura de la cuenca, y guarda estrecha relación con lo obtenido en este perfil. Se

identificaron una serie de picos múltiples, lo que indica que hacia esta zona el subsuelo presenta una configuración mucho más compleja que hacia el noroeste, con presencia de capas de diversa litología posiblemente vinculadas a las formaciones Parángula y Río Yuca.

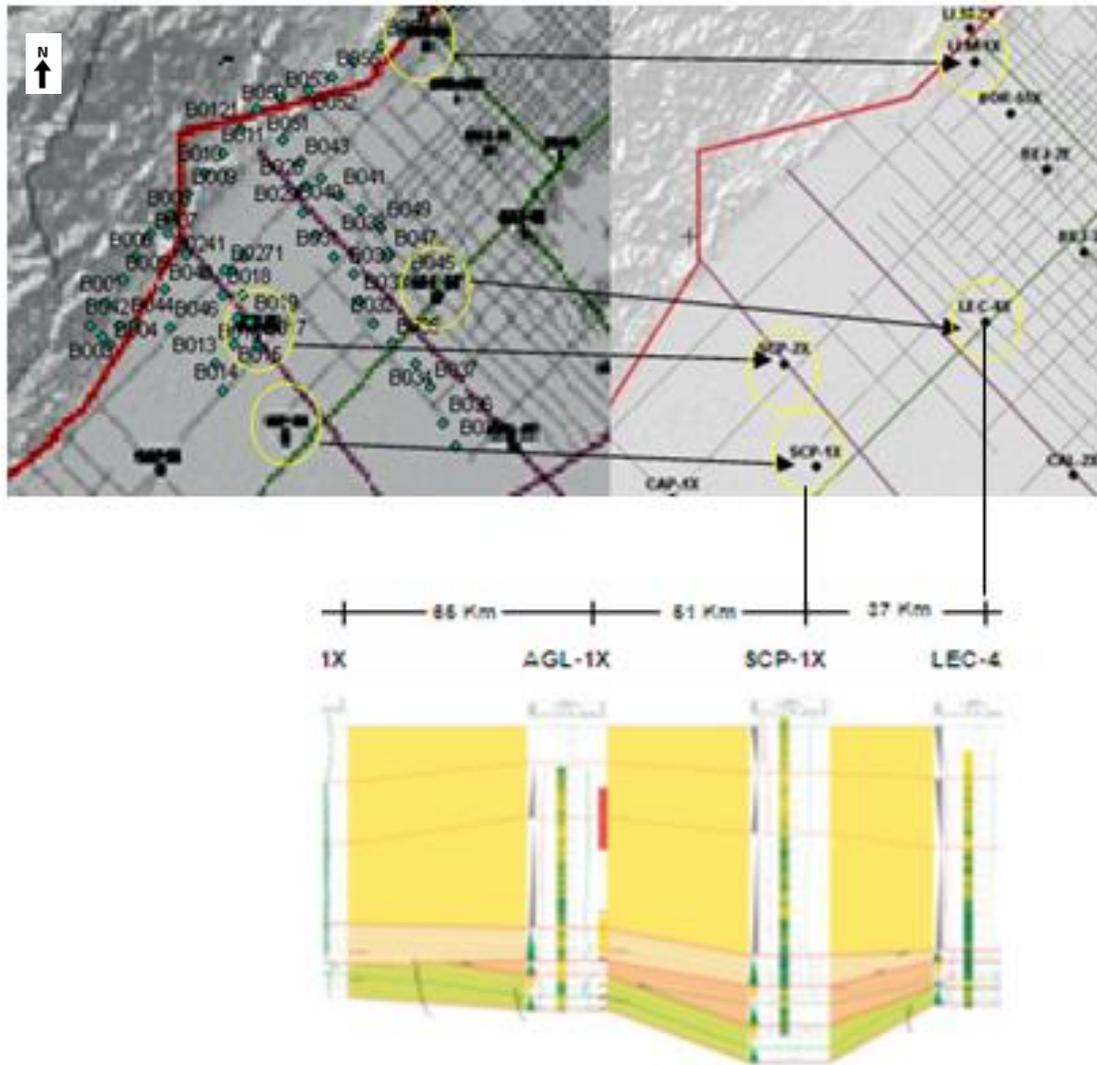


Figura 47. Ubicación referencial de estaciones en estudio de pozos y transecto sísmico con unidades depositacionales. Realizado por PDVSA (2014).

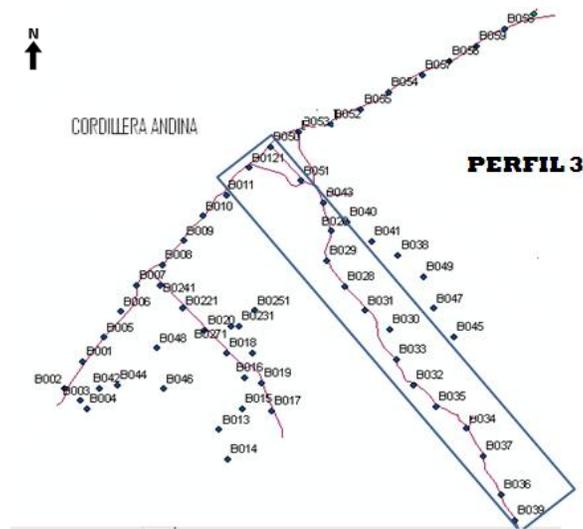


Figura 48. Ubicación de Perfil 3

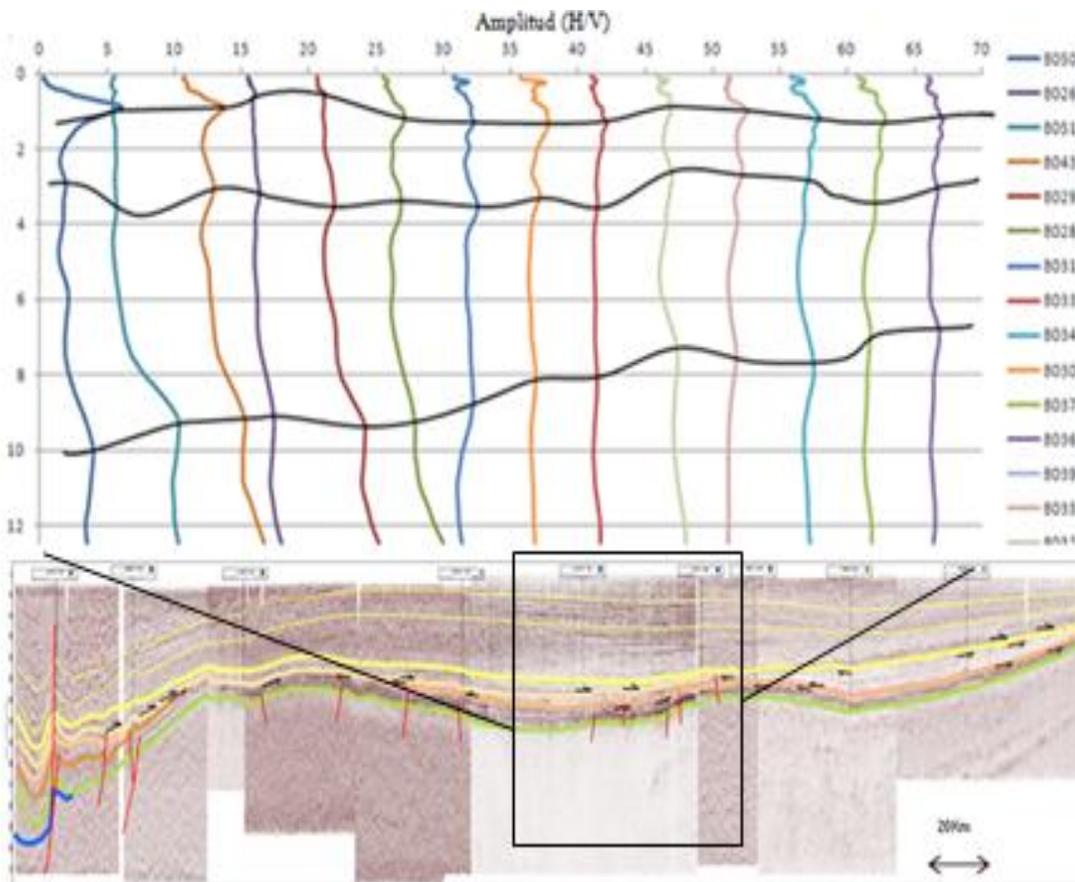


Figura 49. Perfil 3 asociado al transecto sísmico A-A'. Extraído de PDVSA (2014)

En el perfil 4 (figura 50) se puede observar una pronunciada disminución en el espesor de la tercera capa hacia el noreste, esto guarda relación con la geometría de la cuenca, ya que existe una correlación entre la profundidad de las diferentes capas y la respuesta generada a partir del método, así como también la geología asociada a esta zona (figura 51). El primer pico y segundo pico no presentan mayor variación. Se observan picos definidos, esto indica un contraste de impedancia acústica significativo entre capas.

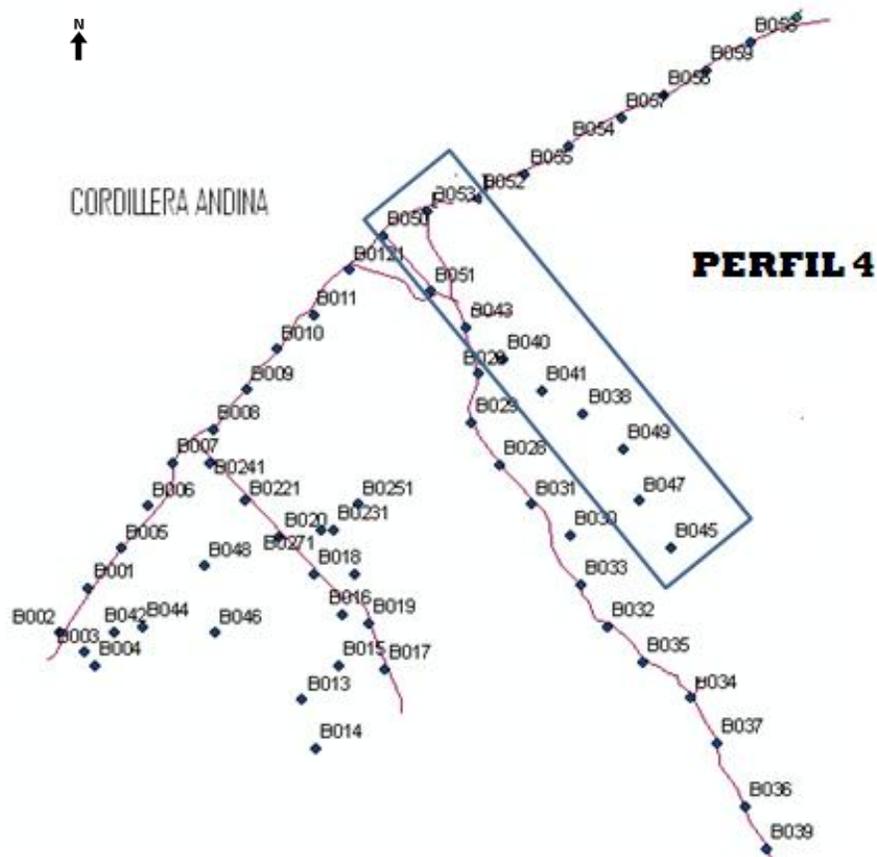


Figura 50. Ubicación de Perfil 4

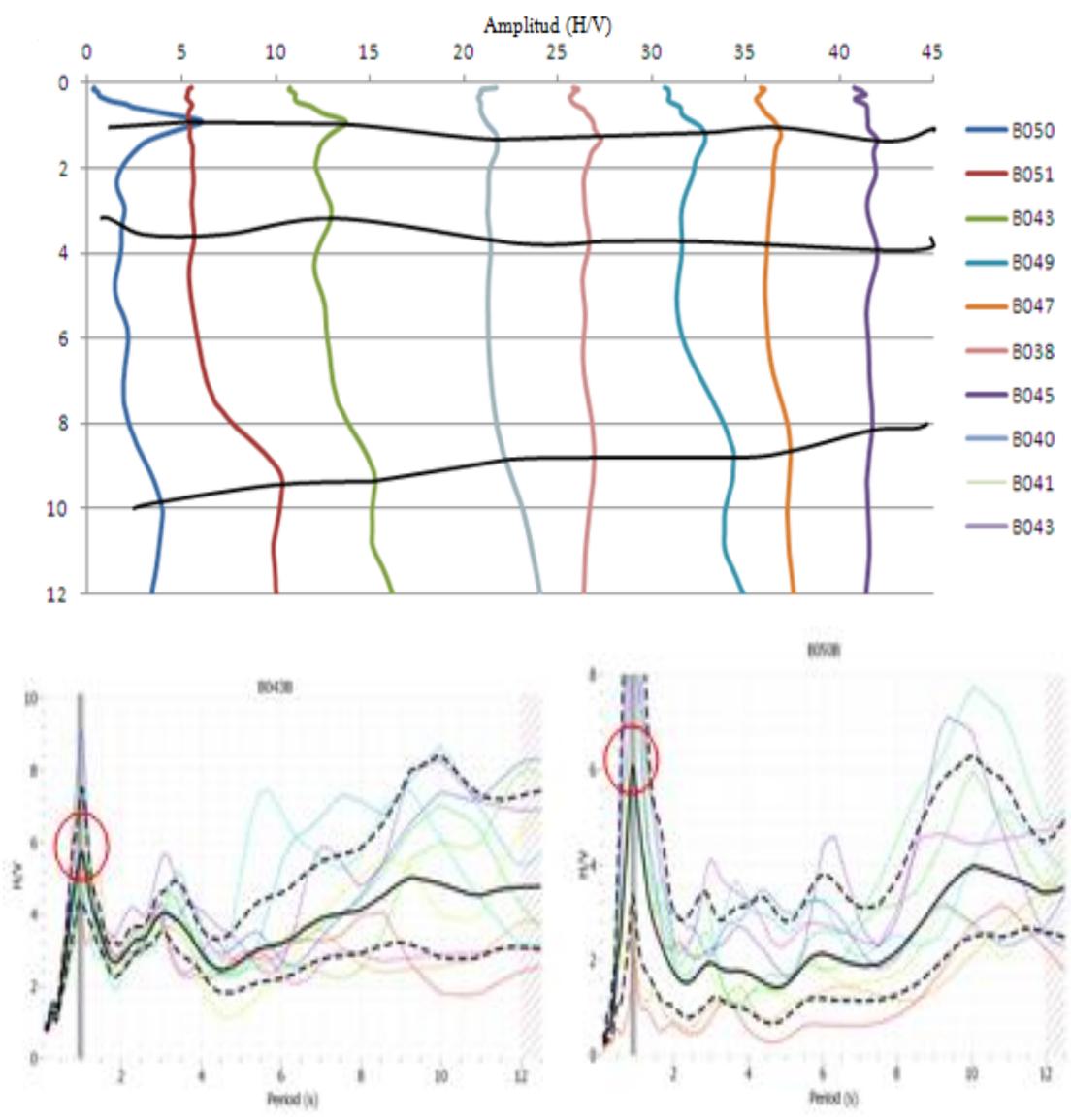


Figura 51. Perfil 4 relacionado a picos definidos (Estaciones B043 Y B050)

5.3 MAPAS DE ISOPERÍODOS Y ESPESORES SEDIMENTARIOS

Los mapas de isoperíodos permiten ver el comportamiento de la respuesta de los coeficientes espectrales, caracterizando la cuenca y generando las posibles capas asociadas a los valores registrados luego del procesamiento. Se elaboraron los mapas de espesores y de isoperíodos con el fin de evaluar la respuesta del sitio, y la geometría asociada, para ello se utilizó el programa ArcGis 10, utilizando como método de interpolación *Natural Neighbor* ya que correlaciona mejor con los resultados del estudio, ya que encuentra el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y les aplica pesos basados en áreas proporcionales (García, 2010).

La figura 48 corresponde al mapa de isoperíodo de la primera capa, donde se obtuvieron valores periódicos en un rango entre 0,52 y 1,86 s. Nakamura (1989) propone que la relación entre los períodos y la profundidad debería ser proporcional, a mayor período, mayor profundidad. En este caso, se observa que hacia el piedemonte de la cordillera de los Andes y hacia el norte de la cuenca se presentan períodos bajos e intermedios con algunas zonas de alto período cerca de la cordillera, no presenta tendencia de variación lateral, sin embargo si se marca una tendencia progresiva de datos de período hacia el este. Esta primera interfase, corresponde al contraste entre la formación Guanapa con aluviones mal escogidos y las arenas y conglomerados de la formación Río Yuca, provenientes de la erosión generada posterior al levantamiento andino y que poseen un variado tamaño de grano.

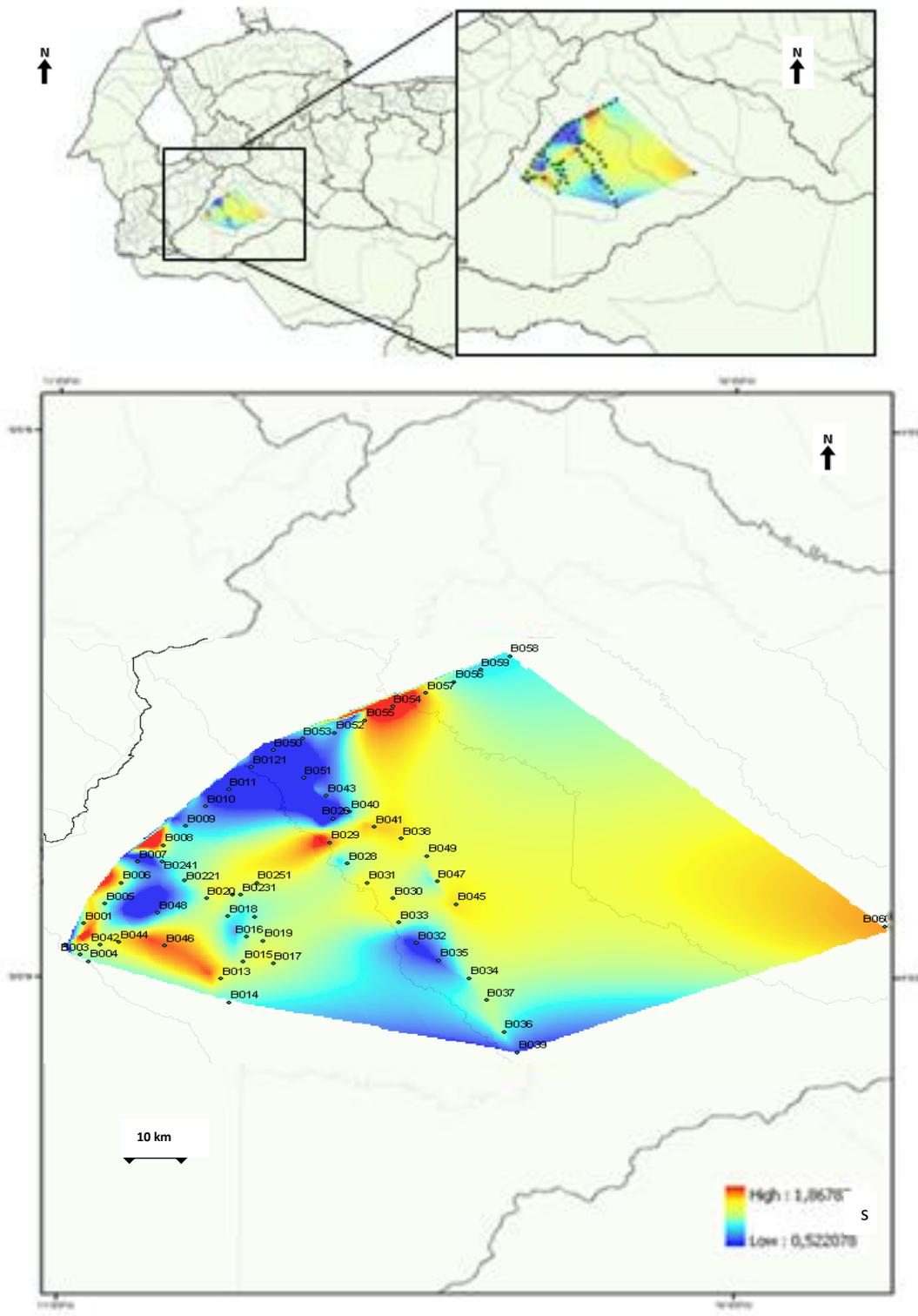


Figura 52. Mapa de isoperíodos para capa 1

El segundo mapa corresponde a los valores de períodos de la segunda capa (figura 49), donde se observan valores más altos hacia el NE, por el contrario hacia el sur se observa una disminución en los valores. Para esta capa, los períodos varían entre 2,22 y 3,86 s. Se observa un aumento hacia el NE de la cuenca, y los valores más bajos se asocian al SE, esto se relaciona con la fase de subsidencia, contemporánea al levantamiento de Los Andes, se la cual instauró una sedimentación continental de relleno de cuenca, depositando las formaciones Parángula y Río Yuca, y donde se observa la presencia de una importante superficie erosiva de edad Oligoceno, de modo que la secuencia Neógena se reduce de manera significativa hacia el piedemonte de la estructura, aumentando su espesor rápidamente hacia el noreste.

Por su parte, el mapa asociado al tercer pico muestra una tendencia bastante definida, donde el período fundamental aumenta considerablemente mientras se aleja de la cordillera andina (figura 50), en este caso, el rango de valores oscila entre 6,3 y 10,25 s. Estos resultados coinciden con los estudios previos realizados a la cuenca los cuales manifiestan que existe un adelgazamiento hacia el sureste, correspondiente al contraste generado por las lutitas de la formación Pagüey y las areniscas de la formación Gobernador. Además la zona de estudio está ubicada en el depocentro de la cuenca que se produce por la flexura producida por el levantamiento andino. La variación lateral no es tan pronunciada, sin embargo se observa una disminución de los valores de períodos hacia el noreste.

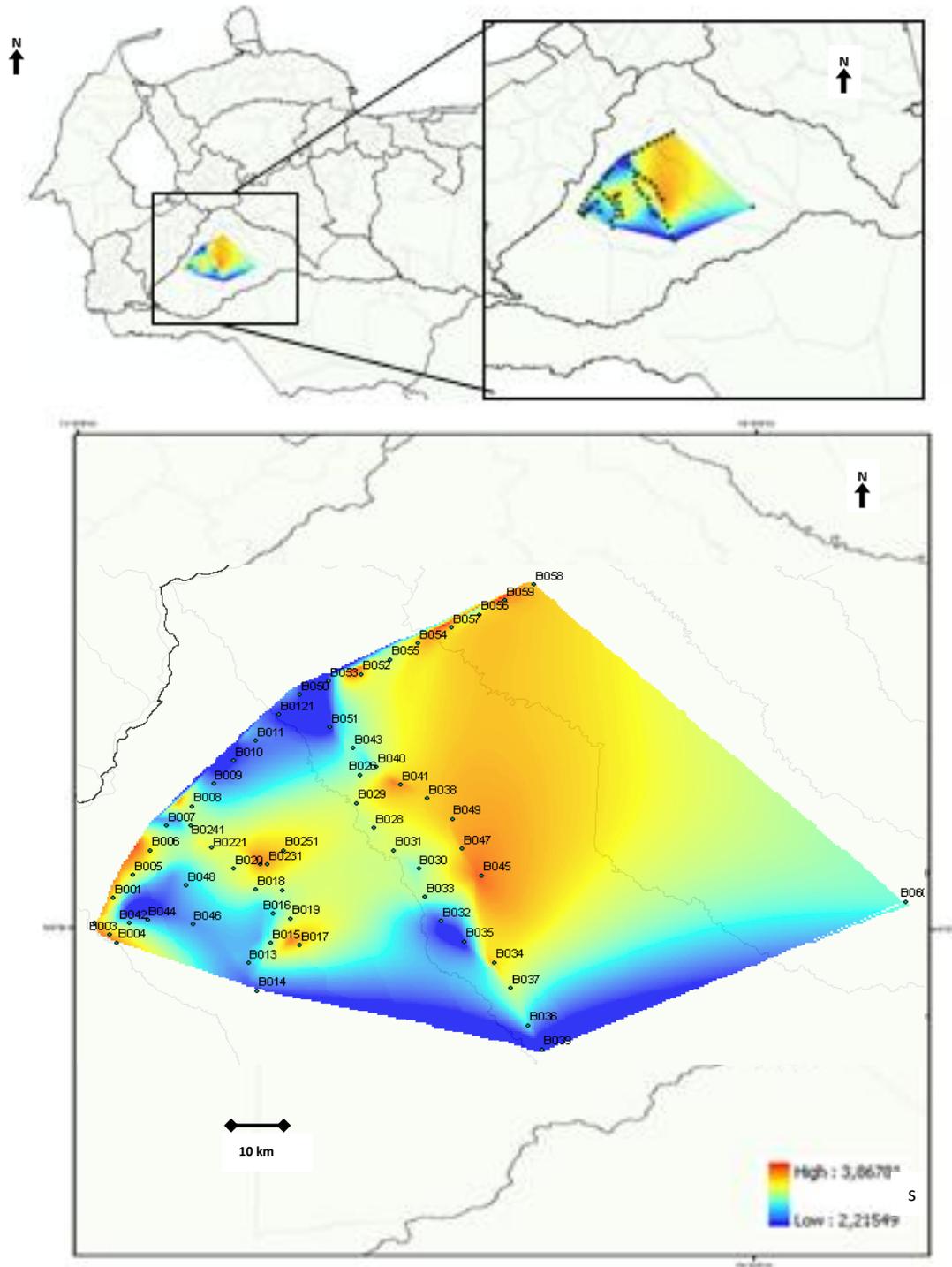


Figura 53. Mapa de isoperíodos para capa 2

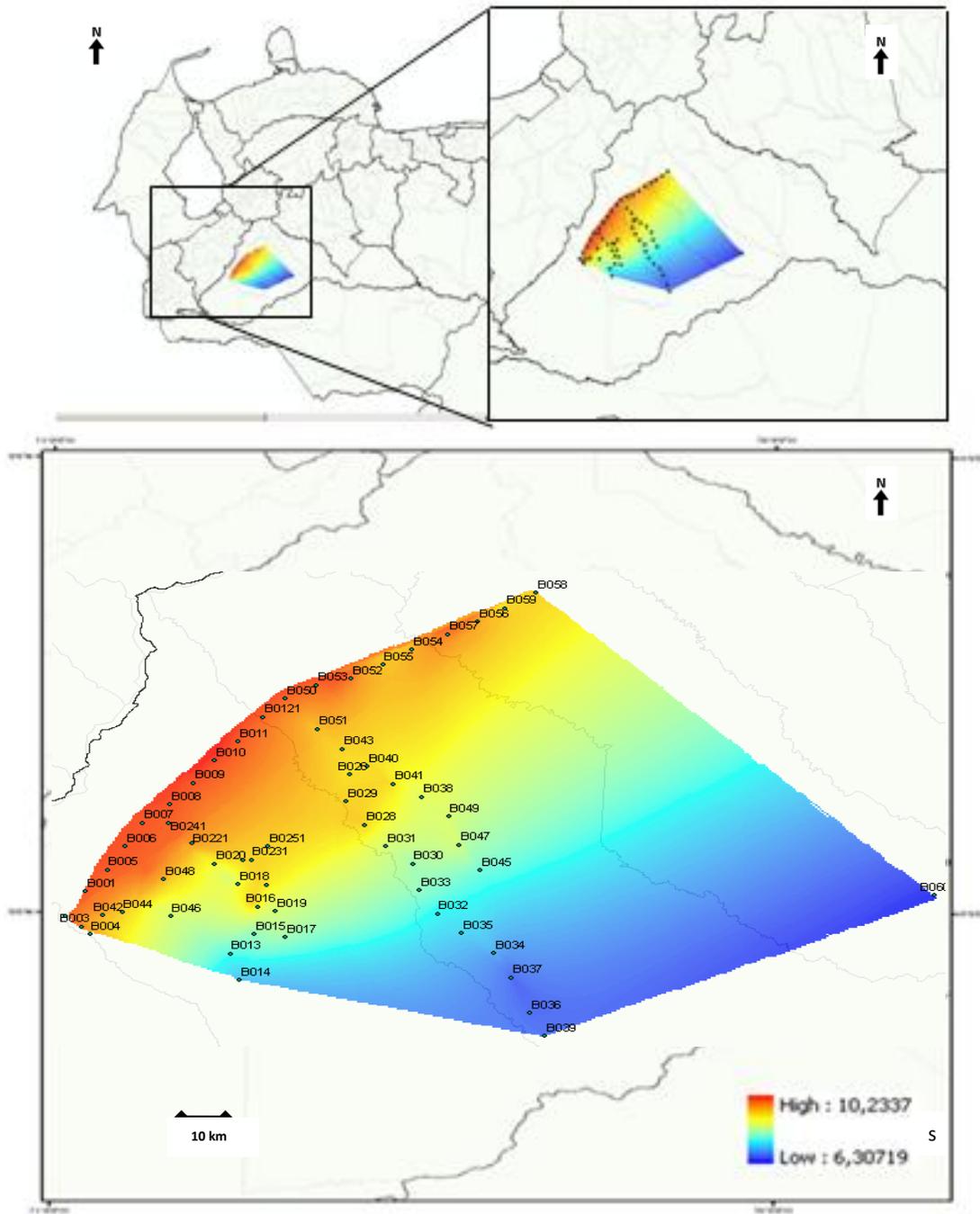


Figura 54. Mapa de isoperíodos para capa 3

Los espesores, por su parte, fueron determinados siguiendo la metodología de Brocher (2005) donde se estableció para la primera capa $V_s= 1016$ m/s, para la segunda capa $V_s=1454$ m/s y para la tercera capa $V_s=1754$ m/s, seguidamente aplicando la fórmula de Kramer (1996) se estableció la relación entre espesor y período fundamental y a partir de allí se generaron los mapas de espesores correspondientes a cada una de las capas asociadas a los períodos fundamentales referidos en cada pico.

A nivel estructural, según Colleta *et al.*, (1997) un anticlinal asimétrico se presenta hacia la zona sureste producto de esfuerzos compresivos posteriores al levantamiento andino, provocando la exposición de las formaciones Parángula y Río Yuca, las cuales se erosionaron y posteriormente se depositaron hacia el sur de la cuenca aumentando su espesor.

En este caso los espesores asociados a la primera capa se establecen en un rango entre 130 y 470 m (figura 55), asociando los máximos a la zona central y hacia el NE del área de estudio y los mínimos valores hacia el sur, con una zona más profunda hacia el noreste, sin embargo, no se marca una tendencia de depositación ya que los procesos de transgresión y regresión no generan un ambiente estable para la sedimentación, por lo que se observa una variación importante en esta capa.

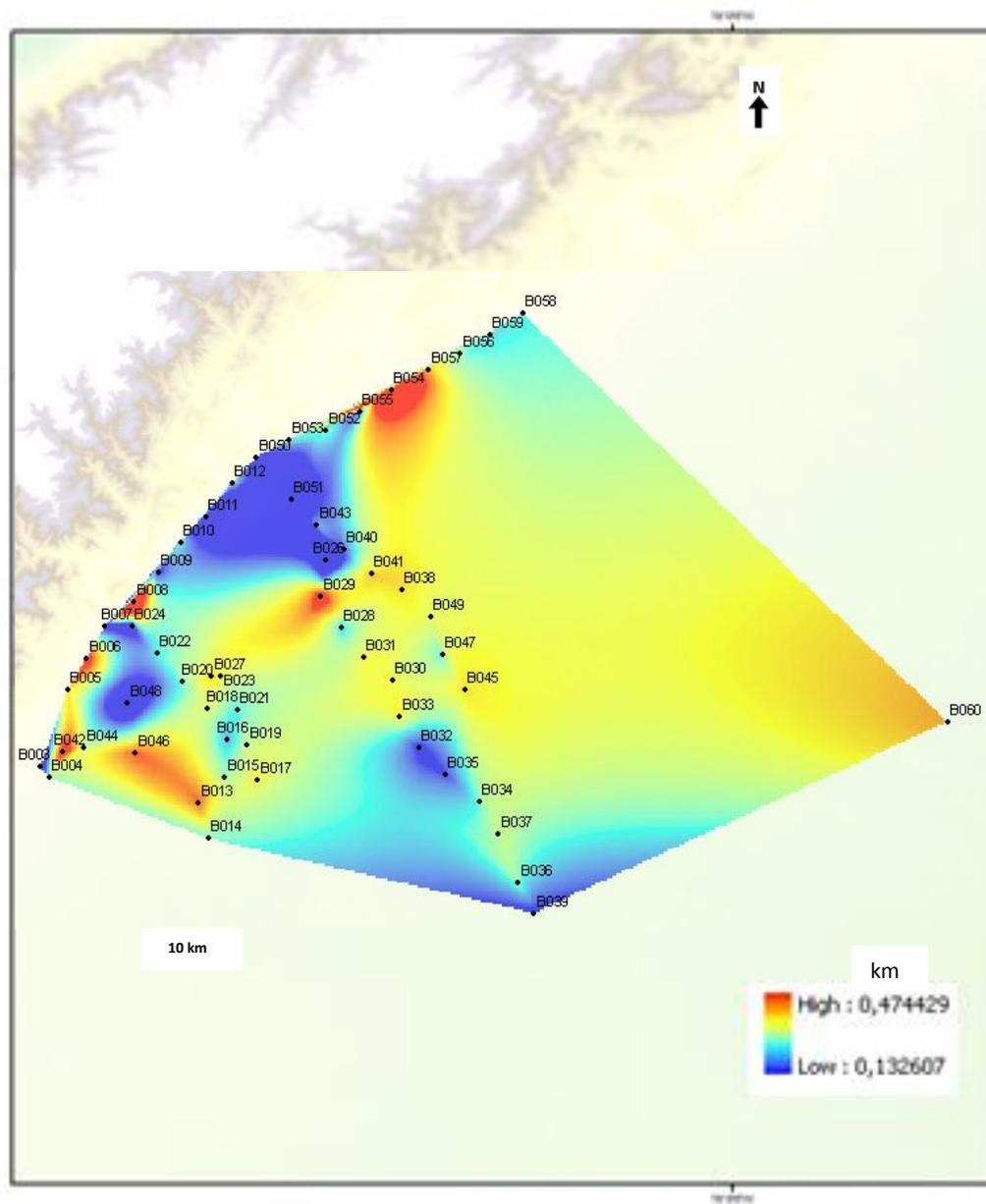


Figura 55. Mapa de espesores para la primera capa.

Para la segunda capa, se observa una tendencia de aumento de espesor hacia el este de la zona de estudio, estableciendo los mínimos espesores cercanos a la cordillera andina, donde también se reportan algunos máximos, en un rango de 800 y 1400 m de espesor, sin tendencia definida a nivel lateral (figura 56). Esta variabilidad se produce por la secuencia flexural que constituyó inicialmente un engrosamiento de cuña sedimentaria hacia el norte,

la elevación del Oligoceno y el surgimiento de la erosión en la parte superior de la secuencia hacia el sureste durante el Eoceno Medio (Colleta, *et al.*, 1997), en el orden crono-estratigráfico la formación Río Yuca está en contacto con la formación Parángula, sin embargo, según Kiser (1997) en el subsuelo, no hay evidencia litológica ni estructural de discordancia con Parángula, por lo cual, el mapa de espesores en este caso concuerda con lo previsto, mostrando el contacto entre las areniscas de la formación Río Yuca y las lutitas de la formación Pagüey.

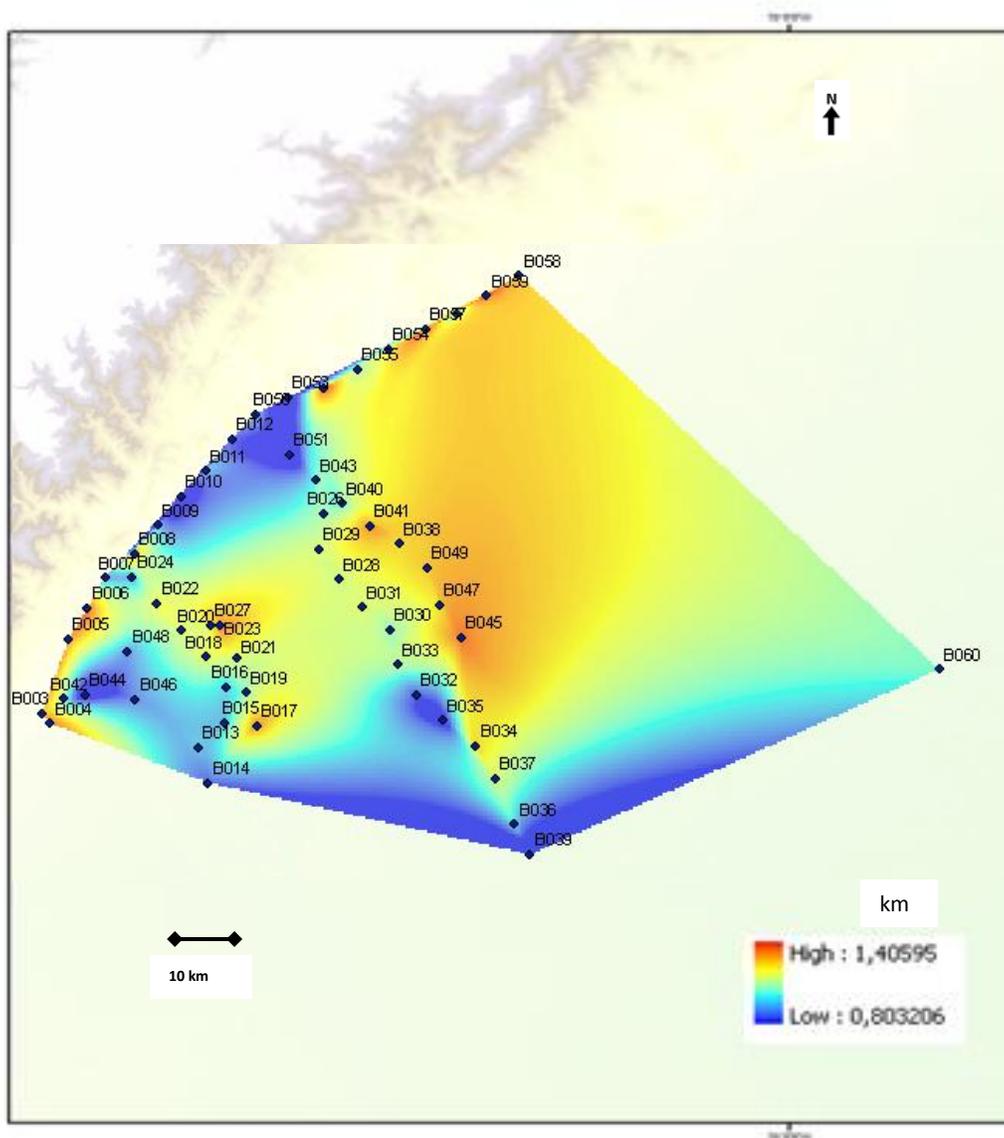


Figura 56. Mapa de espesores para la segunda capa.

Para la tercera capa, se muestra una geometría bastante definida donde los mayores espesores se ubican en la cercanía del piedemonte andino disminuyendo evidenciando un adelgazamiento progresivo producto de la subsidencia flexural vinculada al Eoceno medio y validando la subsidencia presente en la zona producto del levantamiento de los andes (figura 57). Los valores máximos se ubican hacia el norte (4490 m) y los mínimos hacia el sureste, estableciendo también una variación lateral atribuida según Colleta et al. (1997) a que la formación Pagüey durante el Paleógeno se hace más gruesa hacia el norte y su adelgazamiento progresivo hacia el sur resulta de la conjunción de procesos distintos como la elevación del Oligoceno durante el Eoceno Medio, trayendo como consecuencia la erosión de la parte superior de la secuencia. La formación Gobernador, por su parte, es producto de la transgresión marina que se inició en la cuenca de Barinas en el Eoceno medio (Pierce, 1960).

El mapa de espesores de la tercera capa (figura 57) resulta del contacto entre las lutitas de la formación Pagüey y las areniscas cuarzosas de la formación Gobernador. Los valores mínimos de espesor (2760 m) se ubican lo más alejado de la cordillera andina, hacia el sureste del área de estudio. Este resultado coincide también con el mapa estructural del cretácico tardío (figura 9) realizado por PDVSA (2014) donde se observa una tendencia similar al mapa generado a partir de los períodos fundamentales asociados a la tercera capa.

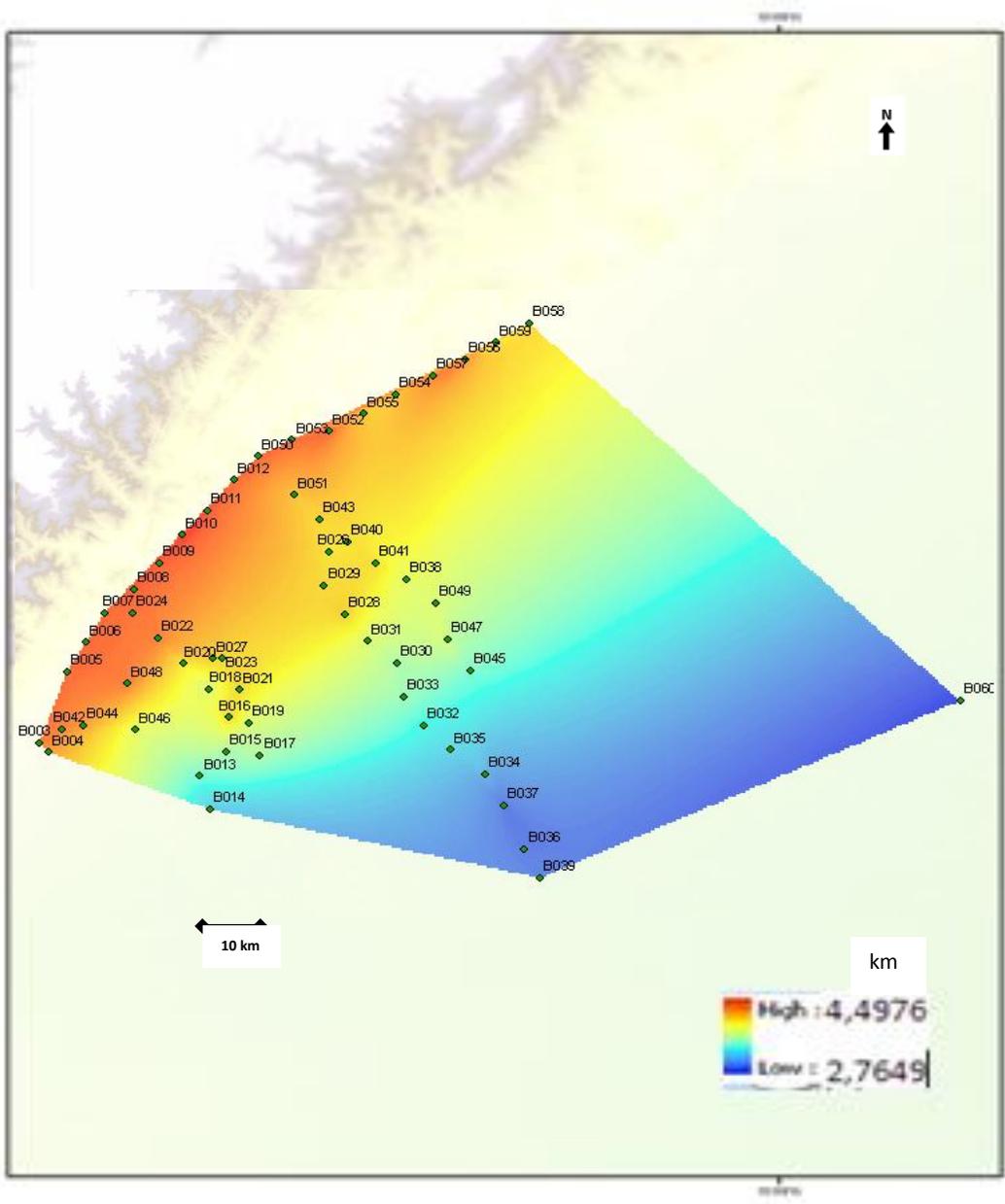


Figura 57. Mapa de espesores para la tercera capa.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos luego del procesamiento de 57 estaciones distribuidas en el área suroeste de la cuenca Barinas-Apure y habiendo analizado la relación espectral basada en el método de Nakamura, se puede concluir lo siguiente:

- El ruido sísmico ambiental, en particular el método de Nakamura, es una técnica sencilla, de bajo costo y que genera una buena respuesta en la caracterización de cuencas y estudios a profundidad, permitiendo definir su geometría y su estructura.
- El análisis de los espectros H/V de las estaciones adquiridas permitió la obtención de 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.
- La profundidad y el período fundamental tienen una relación directamente proporcional, permitiendo así establecer correlación de los resultados obtenidos y la geología de la zona,
- A través del análisis estadístico, se pudo determinar que los picos observados se concentraban en tres sub-poblaciones, la distribución de los datos no es normal, con alta dispersión, que aumenta considerablemente a medida que se profundiza.
- Los valores para la V_s se consideraron como $V_{s1}= 1016$ m/s, $V_{s2}=1454$ m/s y $V_{s3}=1754$ m/s respectivamente, y aplicando la fórmula de Kramer (1996) se estableció la relación entre espesor y período fundamental.

- Para la primera capa se obtienen espesores con un rango entre 130 y 470 m de espesor, determinados a partir de períodos con picos pronunciados y múltiples, que corresponden al contraste entre los aluviones de la formación Guanapa y las arenas y conglomerados de la formación Río Yuca, provenientes de la erosión generada posterior al levantamiento andino y a la variación del tamaño de grano.
- Para la segunda capa se observa un aumento hacia el NE de la cuenca producto de la sedimentación continental de relleno de cuenca, en la cual se depositaron las formaciones Parángula y Río Yuca. Los valores de espesores se establecen un rango entre 800 y 1400m.
- Para el tercer pico, se concentran los mayores espesores en el piedemonte andino y se observa un adelgazamiento progresivo producto de la secuencia flexural vinculada al Eoceno medio y validando la subsidencia presente en la zona producto del levantamiento de los andes, con valores entre 2760 y 4490 m, así como también una variación lateral con disminución hacia el NE. La presencia de máximos espesores puede asociarse a la zona donde fue realizado el estudio.

A partir de las conclusiones establecidas se recomienda:

- Extender la grabación a 60 min o más a fin de validar el método en profundidades aun mayores, ya que es una práctica efectiva y de bajo costo.
- Realizar una nueva medición en las estaciones donde no fue posible la obtención de los tres picos de período fundamental, y la revisión en campo de la señal para verificar que todos los canales estén grabando de manera correcta, de lo contrario repetir la adquisición de datos para esa estación.

- Obtener un mínimo de diez a quince ventanas de longitud y con solapamiento adecuado para mayor aprovechamiento de la señal, para generar mayor calidad de los datos.
- Promover el uso de este método para la caracterización de la cuenca Barinas –Apure en toda su extensión y otras cuencas, y el análisis de amplificación de ruido sísmico ambiental a fin de mitigar el riesgo sísmico en las poblaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade N., Hector J. (2001) *“Interpretación sísmica estructural 3D en la Cuenca Barinas-Apure, Edo. Barinas”*. Tesis Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela
- Arai H. & K. Tokimatsu. (2004). *“S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V. Spectrum”* Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 94, No. 1, pp. 53–63.
- Bonilla L. F., J. H. Steidl, G.T. Lindley, A.G. Tumarkin R., J. Archuleta. (1997). *“Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods”*. Bull. Seism. Soc. Am., 87-3, 710-730
- Bonive, F. A. (2009). *“Desarrollo de Metodología de Inversión para la obtención de modelos corticales 1D de la ciudad de Cumaná, basadas en relaciones H/V, obtenidos a partir de registro de microtremores”* Tesis, Postgrado de Física, Universidad de Oriente, Venezuela
- Bonnefoy-Claudet,S., Baize, S., Bonilla, L.F., Berge-Thierry,c., Pasten, c., Campos, J., Volant, P., Verdugo, R.- (2008) *“Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements”*. Seismology, IRSN Geophys. J. Ins.
- Brocher, Thomas (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.* USGS.U.S. Geological survey
- Campos, V. M., 1977. *“Estratigrafía de la secuencia post-paleozoica en la región de Calderas”*. Mem., II Congr. Latinoamericano de Geología, Minis. Min. e Hidrocarb., Caracas, 1973, (III): 1724-1741
- Colleta, B., Roure, F., De Toni, B., Passalacqua, H., Passalacqua, L. y Gou Y. (1997). Tectonic inheritance, crustal architecture, and contrasting structural styles in the Venezuela Andes. *Tectonics*. 16 (5), 777-794.

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, Caracas, Venezuela.

De Toni, B., Loureiro, D., Márquez, C. y Colleta, B. (1994). “*Eventos y estilos tectónicos en la cuenca Barinas-Apure*”. V *Simposio Bolivariano* (pp. 311-312). Caracas, Venezuela: Sociedad Venezolana de Geólogos.

Dos Santos, S. y Rodriguez, L. (1982) “*Estudio de los análisis de ruido efectuados en la Cuenca Oriental de Venezuela*”. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad Central, Caracas, Venezuela.

.Feo, G. (1972). “*Breves ideas sobre la estructura de la Falla de Oca, Venezuela*”. VI Conferencia Geológica del Caribe. Venezuela:189-190

Field E. H., A.C. Clement, K. H. Jacob, V. Aharonian, S. E. Hough, P. A. Friberg, T. O. Babaian, S. S. Karapetian, S. M. Hovanessian, H. A. Abramian. (1995). “*Earthquake site response in Giumri (formerly Leninakan), Armenia using ambient noise observations*” Bull. seism. Soc. Am., 85, 349-353.

Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (2002). “*La investigación sismológica en Venezuela*”. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Caracas, Venezuela. Recuperado de http://www.funvisis.gob.ve/archivos/pdf/libros/funvisis_1_18.pdf

García, A. (2010). “*Desarrollo y evaluación de métodos avanzados de exploración sísmica pasiva. Aplicación a estructuras geológicas locales del sur de España*”. Tesis doctoral. Universidad de Almería. 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, Caracas, Venezuela.

González De Juana, C., Iturralde, J.M., y Picard, X. (1980). *Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas*. Caracas: Foninves

Guerra, R. (2010) “*Aplicación de la técnica SPAC en la ciudad de Xalapa*” Tesis Universidad Veracruzana, Veracruz, Mexico.

Kiser, G. (1989) *Relaciones estratigráficas de la Cuenca Apure-Llanos, con áreas adyacentes, Venezuela Suroeste y Colombia Oriental*. Monografía. Sociedad Venezolana de Geología. Caracas, Venezuela

Kiser, G. (1989). *Nuevas contribuciones a la geología de la cuenca Barinas-Apure y su frente de montañas*, en prensa.

Kramer, S. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.

Kudo, K. (1995). *Practical Estimates of Site Response. State-of-art Report. Proc. 5th Int. Conf. on Seismic Zonation*, Nice, France, 1878-1907.

Lachet C., D. Hatzfeld, P.-Y. Bard, N. Theodulidis, C. Papaioannou and A. Savvaïdis. (1996). “*Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece): comparison of different approaches*”. Bull. Seism. Soc. Am. 86, 1692-1703

Linares, G. (2005) *Introducción y aplicación de sísmica de microtemores en áreas urbanas*. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.

Lowrie William. (2007). *Fundamentals of Geophysics. Second edition*. Cambridge University Press. CSIC.

Mazuera, F., Gonzalez, L., Rocabado, Victor., Klarica, Stéphanie. (2009). *Determinación de períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Mérida, Venezuela, a partir de mediciones de ruido sísmico ambiental*. Revista Ciencia e Ingeniería. Vol 30, N.1, pp.57-68.

Nakamura, Y. (1989). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*. Quaterly Report Railway Technology. Research. Institute. 30 (1), 25-30.

Notestein, F.B., C. W. Hubman and J. W. Bowler, 1944. *Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America*, Geol. Soc. Am., Bull., 55: 1165-1216.

Petróleos de Venezuela (PDVSA) (1997). *Léxico estratigráfico de Venezuela*. Ministerio de Energía y Petróleo. Caracas, Venezuela. Recuperado de <http://www.pdv.com/lexico/>.

Petróleos de Venezuela (PDVSA) (2010). *Informe de gestión anual*. Ministerio de Petróleo y Minería. Caracas, Venezuela. Recuperado de <http://www.pdvsa.com/interfase.sp/database/fichero/free/7657/1583.pdf>.

Petróleos de Venezuela (PDVSA) (2014). *Análisis de Cuenca*. Proyecto presentado en la primera reunión de GIAME. Mérida, Venezuela

Pierce, G.R., 1960. *Geología de la Cuenca de Barinas*. Mem. III Congr. Geol. Venez., 1: 214-276.

Ramirez, D. (2014) “*Interacción suelo estructura- Caracterización dinámica del suelo para solicitaciones sísmicas- Aplicación método REMI para la ciudad de Temuco*” Tesis Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

REF TEK (2011). *Folleto de especificaciones*. Recuperado de <http://www.Reftek.com/products/seismic-recorders-130-01.htm>.

Renz O., 1959. *Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela occidental*. Bol. Geol., Caracas, 5(10): 3-48. Resumen (1960) en: *Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról.*, Bol. Inform., 3(7): 209.

Rocabado, V. (2012). *Tutorial del uso del equipo Reftek-130 para estudios de ruido ambiental*. Trabajo no publicado. FUNVISIS. Caracas, Venezuela.

Rocabado, V., Schmitz, M., Hernández, J. y Morales, C. (2011). *Relación entre período del suelo y profundidad de los sedimentos para la ciudad de Caracas*. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV*, 26 (2), 141-151.

Rocabado, V., Sánchez, J., Schmitz, M., Bechtold, M. y Andrade, L. (2005). *Caracterización de suelos de Barquisimeto -estado Lara-, aplicando métodos geofísicos y geotécnicos*. Boletín Técnico IMME. 43 (2). Caracas, Venezuela.

Rocabado, V., Sánchez, J., Schmitz, M., Hernandez, J. y Morales, C. (2011). *Relación entre período del suelo y profundidad de los sedimentos para la ciudad de Caracas, Venezuela*. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV.*, Vol 25, N.2, pp 5-6.

Salvador, A.,1961a. “*Guidebook to the geology of northeastern Trujillo*”. Soc. Geol. Venez. Occid., Guidebook N° 3, 33 p.

Salvador, A.,1961b. “*Nomenclature of the Las Piedras and related formations in eastern Venezuela*”. Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról., Bol. Inform., 4(10): 297-327.

Schlumberger Oilfield Services (1997). WEC Venezuela 1997 - Evaluación de Pozos.

Von Der Osten, 1966. *The stratigraphy of Sinco Field*. Bol. AVGMP, 9(9): 253-272.

Yauri, S. (2006). *Microtremores*. Compendio de trabajos de investigación. Instituto Geofísico del Perú. (7), 43-56.

Yoris, F. y Ostos, M. (1997). *Geología de Venezuela: geología general y sus cuencas petrolíferas*. WEC 1997. Schlumberger, pp. 44. Caracas, Venezuela.

Páginas web: www.reftek.com

www.garmin.com

APÉNDICE A

Datos de períodos fundamentales y profundidades estimadas correspondientes a cada estación adquirida.

Estación	X	Y	Altura (m)	Período 1	Espesor (m)	Período 2	Espesor (m)	Período3	Espesor (m)
B002	-70,935	8,062	218,103	0,8509	0,2340	3,1692	1,1092	9,9783	3,9913
B003	-70,913	8,044	181,333	0,7800	0,2145	3,6192	1,2667	9,9783	3,9913
B004	-70,902	8,032	-	1,1111	0,3056	3,7778	1,3222	NA	NA
B005	-70,879	8,138	240,213	1,2345	0,3395	3,7014	1,2955	10,0879	4,0352
B006	-70,855	8,177	259,199	1,4538	0,3998	3,8385	1,3435	10,0879	4,0352
B007	-70,832	8,216	253,912	0,8889	0,2444	2,8056	0,9820	10,0833	4,0333
B008	-70,796	8,247	260,881	1,8924	0,5204	3,7014	1,2955	10,1153	4,0461
B009	-70,765	8,282	218,824	0,9056	0,2490	2,8791	1,0077	10,1111	4,0444
B010	-70,737	8,319	228,918	1,0833	0,2979	2,1944	0,7680	10,2500	4,1000
B011	-70,705	8,350	248,865	0,6531	0,1796	2,9614	1,0365	10,1428	4,0571
B012	-70,673	8,391	239,973	1,0701	0,2943	2,6873	0,9406	10,0879	4,0352
B013	-70,715	8,001	129,422	1,3442	0,3697	2,9340	1,0269	7,7307	3,0923
B014	-70,703	7,957	127,259	1,0975	0,3018	2,6873	0,9406	7,2373	2,8949
B015	-70,683	8,033	146,966	1,1200	0,3080	2,8800	1,0080	8,0300	3,2120
B016	-70,679	8,078	132,066	1,0153	0,2792	2,9614	1,0365	9,2656	3,7062
B017	-70,641	8,029	133,748	1,2071	0,3320	3,7288	1,3051	8,0870	3,2348
B018	-70,704	8,116	182,535	1,1797	0,3244	3,3725	1,1804	8,5256	3,4102
B019	-70,655	8,071	148,889	1,1523	0,3169	3,1258	1,0940	8,5530	3,4212
B020	-70,736	8,149	180,612	1,0975	0,3018	3,3177	1,1612	9,0189	3,6076

B021	-70,667	8,114	151,773	1,0701	0,2943	3,3177	1,1612	9,1834	3,6734
B022	-70,767	8,183	197,195	1,0701	0,2943	3,4272	1,1995	9,9235	3,9694
B023	-70,688	8,156	159,223	1,2000	NA	3,7778	1,3222	9,1944	3,6778
B024	-70,798	8,216	207,529	0,8234	0,2264	2,8243	0,9885	NA	NA
B026	-70,556	8,297	160,665	0,5106	0,0000	3,1658	0,0000	9,0784	0,0000
B027	-70,699	8,156	155,137	1,2500	0,1404	3,3333	1,1080	9,3056	3,6314
B028	-70,537	8,214	140,958	1,0556	0,3438	3,2778	1,1667	9,2500	3,7222
B029	-70,562	8,252	153,215	1,4444	0,2903	3,3056	1,1472	9,1944	3,7000
B030	-70,472	8,150	140,237	1,2071	0,3972	3,1258	1,1570	8,0596	3,6778
B031	-70,509	8,179	131,825	1,2071	0,3320	3,3451	1,0940	8,5530	3,2238
B032	-70,439	8,068	145,765	0,9056	0,3320	2,6599	1,1708	7,5388	3,4212
B033	-70,463	8,106	139,516	1,2100	0,2490	3,2400	0,9310	7,9800	3,0155
B034	-70,364	8,003	130,384	1,0975	0,3328	3,5918	1,1340	7,1277	3,1920
B035	-70,407	8,036	131,104	0,9330	0,3018	2,4132	1,2571	7,3469	2,8511
B036	-70,315	7,904	122,212	1,1249	0,2566	3,0162	0,8446	6,6617	2,9388
B037	-70,340	7,963	127,259	1,1523	0,3093	NA	1,0557	6,6170	2,6647
B038	-70,461	8,260	151,052	1,2300	0,3169	3,5278	NA	8,6100	2,6468
B039	-70,296	7,866	113,561	0,9056	0,3383	2,1939	1,2347	6,7165	3,4440
B040	-70,533	8,310	160,184	0,9444	0,2490	3,0278	0,7679	NA	2,6866
B041	-70,499	8,281	158,983	1,2620	0,2597	3,7288	1,0597	NA	NA

B042	-70,885	8,063	169,797	1,4800	0,3471	3,2100	1,3051	9,8700	NA
B043	-70,567	8,339	166,192	1,0300	0,4070	3,1400	1,1235	9,2200	3,9480
B044	-70,859	8,068	164,270	1,1523	0,2833	2,3309	1,0990	9,7042	3,6880
B045	-70,382	8,140	133,027	1,2345	0,3169	3,7837	0,8158	7,7659	3,8817
B046	-70,794	8,062	160,665	1,3442	0,3395	2,7969	1,3243	8,6626	3,1064
B047	-70,410	8,182	135,911	1,0833	0,3697	NA	0,9789	8,5000	3,4650
B048	-70,804	8,123	189,264	0,7138	0,2979	2,8243	NA	9,9235	3,4000
B049	-70,425	8,229	147,447	1,1944	0,1963	3,5833	0,9885	8,5556	3,9694
B050	-70,643	8,422	240,934	0,8873	0,3285	2,9118	1,2542	10,1100	3,4222
B051	-70,599	8,372	187,101	0,5161	0,2440	2,2360	1,0191	9,3653	4,0440
B052	-70,556	8,455	212,335	1,1111	0,1419	3,8890	0,7826	10,1111	3,7461
B053	-70,601	8,444	234,445	1,0581	0,3056	2,2351	1,3612	10,0638	4,0444
B054	-70,474	8,504	200,800	1,8376	0,2910	3,4547	0,7823	9,2930	4,0255
B055	-70,514	8,479	209,451	0,9330	0,5053	3,1806	1,2091	9,3205	3,7172
B056	-70,388	8,550	224,832	1,0975	0,2566	3,0984	1,1132	9,8687	3,7282
B057	-70,427	8,529	233,003	1,2620	0,3018	3,8659	1,0844	9,9509	3,9475
B058	-70,309	8,598	225,794	1,0701	0,3471	3,5644	1,3531	9,2382	3,9804
B059	-70,350	8,572	221,708	1,0427	0,2943	3,8933	1,2475	9,0189	3,6953
B060	-69,778	8,100	86,404	1,2890	0,2867	3,0984	1,3627	6,3054	3,6076

NA= Pico no identificado

APÉNDICE B

Gráficos de período versus amplitud H/V correspondientes a cada estación.

ESTACIÓN	ESPECTRO
B002	
B003	
B004	
B005	
B006	

