



Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Año 2023

Tesis de Grado en Geofísica

CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE SITIO EN LA  
ISLA DE TIERRA DEL FUEGO MEDIANTE LA  
RELACIÓN ESPECTRAL H/V

Guadalupe Flores

Directora: Dra. María Laura Rosa

Firma y aclaración de la Directora:

Dra. María Laura Rosa

Firma y aclaración del Jurado:

Dr. Casas, J. Augusto

Dra. Celeste Bollini

# Resumen

La relación espectral entre las amplitudes horizontal y vertical de los registros de vibraciones en función de la frecuencia presenta una alta sensibilidad a la estructura cortical cercana a la superficie. En conjunto con otras técnicas se aplica para caracterizar efectos de sitio y realizar investigaciones de microzonificación sísmica, siendo recomendada su aplicación en áreas de sismicidad baja a moderada. Esta tesis introduce el primer estudio sobre el efecto de sitio en la región de Tierra del Fuego, lo que conlleva un avance sustancial en la determinación del riesgo sísmico en la Isla.

En este trabajo se caracterizó la estructura de velocidad de la onda S en los sedimentos para la región de Tierra del Fuego, a partir de la relación espectral HVSR. Utilizando datos de la Red Sismológica de Tierra del Fuego de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, datos de las Redes Nacionales chilenas C y C1 y de redes pertenecientes a los proyectos SEPA y SEPA II, se calcularon curvas H/V con el objetivo de obtener frecuencias fundamentales de sedimentos.

Por inversión de curvas H/V se obtuvieron modelos de estructura cortical debajo de dos estaciones cuyos resultados posibilitaron la estimación de frecuencias fundamentales.

Para el cálculo de las relaciones HVSR se utilizaron dos softwares de uso libre, *Geopsy* y *IRIS HVSR Station Toolbox*. Los resultados permitieron comparar el desempeño de ambos programas, considerando el tiempo de procesamiento y la variedad de herramientas para su aplicación en registros de diferentes estaciones.

# Agradecimientos

*A la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata, por una educación de excelencia. A todos sus docentes, por su empatía y calidez.*

*A mi directora María Laura, por su paciencia y confianza. Su constante disposición y sus incontables consejos fueron indispensables en mi crecimiento profesional.*

*A mi mamá, mi papá y mis hermanas. A mis abuelos, tíos y primos. Por darme un hogar lleno de amor y respeto. Siempre fomentaron mi curiosidad y me alentaron en cada paso.*

*A Araceli, quien se sentó a mi lado en el curso de ingreso y se mantuvo presente hasta el día de hoy. Esta carrera la hicimos juntas.*

*A mis amigos y compañeros de la facu, quienes, entre risas, alivianaron cualquier preocupación. A mis amigos, los de la escuela y los de la vida, por festejar cada logro y acompañar en cada momento difícil.*

*A la educación pública, gratuita y de calidad, por abrirme las puertas a un universo de posibilidades y brindarme enseñanzas mucho más allá de los libros.*

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Marco conceptual . . . . .	1
1.2. Isla de Tierra del Fuego . . . . .	6
1.3. Interés sismológico . . . . .	10
1.4. Otros Antecedentes . . . . .	11
1.5. Motivación . . . . .	12
1.6. Objetivos . . . . .	13
<b>2. Marco teórico</b>	<b>14</b>
2.1. Relación H/V . . . . .	14
2.1.1. Técnica HVSR . . . . .	16
2.2. Problema inverso . . . . .	26
<b>3. Datos y Metodología</b>	<b>28</b>
3.1. Datos . . . . .	28
3.2. Cálculo de curvas H/V . . . . .	30
3.2.1. Geopsy . . . . .	30
3.2.2. IRIS HVSR Station Toolbox . . . . .	34
3.3. Inversión . . . . .	36
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>38</b>
4.1. Análisis de curvas H/V . . . . .	38
4.1.1. Estación BETA . . . . .	38
4.1.2. Estación TRVA . . . . .	40
4.1.3. Estación ELCA . . . . .	41
4.1.4. Estación DSPA . . . . .	45
4.1.5. Estación MG01 . . . . .	46
4.1.6. Estación MG02 . . . . .	48

4.1.7. Estación MG03 . . . . .	49
4.1.8. Estación VTDF . . . . .	50
4.1.9. Estaciones GO10 y PARE . . . . .	51
4.2. Inversión de curvas H/V . . . . .	54
4.3. Resumen de resultados . . . . .	62
<b>5. Conclusión</b>	<b>65</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>

# Índice de figuras

1.1. Sismicidad global. La distribución de los terremotos evidenció una gran ocurrencia en límites de placas (Stein y Wysession, 2003). . . . .	2
1.2. Bordes de placa: convergente, donde una placa subduce debajo de otra destruyendo litósfera; divergente, donde las placas se alejan mutuamente y se crea nueva litósfera; y transformante, donde hay movimiento relativo de placas sin destrucción ni creación de litósfera (Stein y Wysession, 2003). . .	2
1.3. Ondas de cuerpo. Arriba: ondas P, donde el material se expande y contrae. Abajo: ondas S, donde el material cambia de forma (Shearer, 2009). . . . .	3
1.4. Arriba: sismogramas de la componente vertical del movimiento del suelo donde se diferencia la onda superficial Rayleigh del registro total. Abajo: contenido en frecuencia de las ondas. Las ondas de cuerpo predominan en frecuencias mayores, mientras que las ondas superficiales se encuentran a menores frecuencias (Stein y Wysession, 2003). . . . .	4
1.5. Principales componentes presentes en el espectro del ruido sísmico. Con gris oscuro se señalan donde los niveles de potencia del ruido sísmico tiene mayores probabilidades en cada período. Con líneas sólidas se indican las líneas de base estadísticas del 10 %, 50 % y 90 %. NHNM: envolvente superior para períodos ruidosos, NLNM: envolvente inferior para períodos ruidosos. Además, se encuentran indicados los microsismos primario y secundario (McNamara y Boaz, 2019). . . . .	5
1.6. Ambiente tectónico en la Isla de Tierra del Fuego. Ubicación de la Isla de Tierra del Fuego (TdF), Fosa Chilena (FCH), Dorsales Norte y Sur del Mar de Scotia (NSR), (SSR) y Zona de Fractura de Shackleton (ZFS) (Febrer et al., 2000; Buffoni et al., 2009) . . . . .	7
1.7. Unidades morfoestructurales principales en Tierra del Fuego (Menichetti et al., 2008) . . . . .	8

1.8.	Sismicidad de bajo nivel en Tierra del Fuego. Los triángulos negros muestran la ubicación de las estaciones simológicas argentinas (Bollini, 2021).	10
2.1.	Procesamiento HVSR para la estación ELCA el 20 de julio del 2008 a las 21hs UTC. Arriba: elección de intervalo temporal total de una hora y ventaneo de 30 segundos; abajo: a la izquierda curvas H/V para cada ventana y a la derecha curva H/V final con resultados estadísticos. La curva negra de trazo grueso muestra el resultado de promediar las curvas H/V de cada ventana, mientras que las curvas segmentadas consideran la desviación estándar de amplitud. La franja gris se centra en la frecuencia fundamental media y su ancho está definido por la desviación estándar de frecuencias.	18
2.2.	Ejemplo de curva H/V con un único pico claro. En esta situación es posible obtener una estimación de la frecuencia fundamental del suelo (Marcellini, 2006).	21
2.3.	Ejemplo de curva H/V con dos picos claros. En este caso se considera el pico de menor frecuencia como el estimativo de $f_0$ (Marcellini, 2006).	22
2.4.	Ejemplo de curva H/V con pico de origen industrial. Estos casos alteran significativamente la estimación de la frecuencia fundamental del sitio por lo que, en caso de no poder corregirse, deben descartarse (Marcellini, 2006).	22
2.5.	Ejemplo de curva H/V con un pico no claro de baja frecuencia. En estos casos es necesario analizar registros en zonas aledañas y controlar las condiciones meteorológicas durante la medición (Marcellini, 2006).	23
2.6.	Ejemplo de curva H/V con múltiples picos que no cumplen con suficientes criterios de claridad. Este caso no se considera apto para interpretación directa. Se recomienda revisar el procesamiento y curvas en zonas cercanas (Marcellini, 2006).	24
2.7.	Ejemplos de curva H/V plana. Se muestran casos donde la estación simológica se encuentra sobre roca y sobre sedimentos. Debe considerarse la posibilidad de que no existan grandes contrastes de impedancia en profundidad (Marcellini, 2006).	25
3.1.	Localización de las estaciones cuyos registros fueron utilizados.	28
3.2.	El recuadro verde indica la ventana a analizar en <i>Geopsy</i> para el cálculo de la relación H/V de los registros de la estación ELCA durante el 1° de abril de 2008.	31

3.3.	Parámetros utilizados durante el procesamiento con <i>Geopsy</i> . Se indica la ventana de tiempo analizado, longitud y superposición de ventanas, taper y suavizado aplicado. . . . .	32
3.4.	Ejemplo de curva horaria calculada para los registros de la estación ELCA a las 5am UTC del 1 de abril de 2008 con el software <i>Geopsy</i> . Los colores permiten relacionar cada curva del gráfico con la ventana temporal a la que corresponde. La curva negra de trazo grueso es el resultado del promedio de todas las ventanas, mientras que las curvas negras segmentadas tienen en cuenta los datos estadísticos obtenidos. La franja gris, centrada en la frecuencia fundamental media, indica la desviación estándar de frecuencias.	33
3.5.	Ejemplo de control con HVTEST para la curva H/V de los registros del 1 de abril de 2008 de la estación ELCA. En este caso cumple todos los criterios de confiabilidad y cuatro de los seis criterios de claridad. . . . .	33
3.6.	Ejemplo de curva H/V calculada de los registros de la estación PARE durante el mes de abril de 2001 utilizando <i>IRIS HVSR Station Toolbox</i> . En el título se especifica que se implementó la media geométrica para el cálculo. Con trazo azul se marca la curva promedio H/V y con trazo segmentado rojo se muestran las curvas que consideran la desviación estándar. El código automáticamente identifica el máximo y lo indica en el gráfico. . . . .	35
3.7.	Ejemplo de salida para el cálculo de la relación H/V de los registros en la estación PARE durante el mes de abril de 2001 usando <i>IRIS HVSR Station Toolbox</i> . Luego del cálculo de la curva, se revisan los criterios de claridad según Marcellini (2006) y se le asigna un puntaje, en este caso 5/6. . . . .	36
3.8.	Ejemplos de resultados de inversión de curva H/V con el software <i>Dinver</i> . La curva de elipticidad negra se obtiene a partir de la curva H/V ingresada y es la utilizada por el software para realizar el proceso de inversión. El programa evalúa diferentes modelos de subsuelo a partir de un modelo inicial, obteniendo las respuestas teóricas de relación H/V y los errores respecto de la curva H/V ingresada. Los colores indican el error del ajuste, siendo rojos los modelos con menor error y azul aquellos con mayor error.	37
4.1.	Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación BETA desde agosto 2012 hasta julio 2013. No hay pico considerable. Este comportamiento no muestra variaciones estacionales. . . . .	39

4.2. Análisis de criterios para la curva mensual de BETA en febrero de 2013. Cumple con los tres criterios de confiabilidad por lo que la curva fue procesada correctamente, pero el pico cumple solamente con dos criterios de claridad, lo que indica que no es un pico confiable. . . . .	40
4.3. Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación TRVA durante el 2012. No hay pico considerable y no muestra variaciones estacionales. . . . .	40
4.4. Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación ELCA durante el 2008. Las curvas muestran un pico permanente a lo largo del año de origen industrial. . . . .	41
4.5. Variación de la curva H/V para registros de la estación ELCA, durante un día laboral (20 de mayo) y un día feriado (20 de junio). La comparación muestra como las amplitudes aumentan durante horas de trabajo y se mantienen bajas en días de descanso. Este comportamiento es un indicio de que se trata de un pico de origen industrial. . . . .	42
4.7. Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación DSPA durante el 2015. Las curvas presentan un pico que no cumple con suficientes criterios de claridad, sin embargo se considera que su permanencia temporal sugiere un efecto de sitio generado por un reflector somero. . . . .	45
4.8. Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación MG01 durante el 2016. Existe un pico claro sin variación estacional que cumple con suficientes criterios de claridad, causado posiblemente por un reflector profundo. . . . .	46
4.9. Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación MG02 durante el 2019. El pico claro y sin variaciones estacionales muestra el efecto de sitio causado por un reflector profundo. . . . .	48
4.10. Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación MG03 desde marzo del 2018 hasta febrero del 2019. No hay pico considerable y no muestra variaciones estacionales. . . . .	49
4.11. Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación VTDF durante 1998. No hay pico considerable y no muestra variaciones estacionales. . . . .	50
4.12. Comparación de curvas mensuales en el mes de febrero para las estaciones GO10 y PARE. A pesar de su proximidad, las curvas muestran ser claramente diferentes. . . . .	52

4.13. Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación GO10 durante el 2013. En esta figura se eligió destacar el pico de menor frecuencia que no cumple con suficientes criterios de claridad pero que tiene una amplitud mayor a 2. Se considera que su permanencia en el tiempo y su amplitud son indicios de una probable fuente en un reflector profundo, por lo que no se descarta. . . . .	53
4.14. Comparación de la relación potencial entre la frecuencia fundamental y el espesor de los sedimentos para diferentes cuencas sedimentarias (Gosar y Lenart, 2010). Cada línea indica el resultado obtenido siguiendo los parámetros de cada trabajo. Estas relaciones permiten obtener un primer estimativo de profundidades según frecuencias fundamentales. . . . .	55
4.15. Curva H/V obtenida con los datos del mes de julio del 2016 en la estación MG01. El pico observado es claro y confiable. Al ser de frecuencia mayor a 1 Hz, indica la presencia de un reflector somero. . . . .	56
4.16. Recorte de perfil estructural extraído de Menichetti et al. (2008). La línea roja en el mapa inferior de Tierra del Fuego muestra la zona del perfil recortada, mientras que el recuadro rojo en el perfil resalta la zona de interés. La estación MG01 se encuentra sobre la Isla Navarino, muy cercana a la línea del perfil. . . . .	57
4.17. Modelos iniciales de velocidades para la inversión de la curva H/V de la estación MG01. En la fila superior se muestra el modelo inicial N°7 ingresado y la serie de modelos obtenidos con el software <i>Dinver</i> . En la fila inferior se muestran los gráficos correspondientes al modelo inicial N°8. La curva negra muestra la curva de elipticidad equivalente a la curva H/V ingresada, mientras que la escala de colores indica con rojo los modelos con menor error, y con azul aquellos con mayor error. . . . .	58
4.18. Resultados finales de la inversión de curvas H/V para la estación MG01. La iteración de ambos modelos redujeron el error significativamente, corroborando la presencia de un horizonte con alto contraste de impedancia a una profundidad de 120 metros. . . . .	59
4.19. Resultado de la relación HVSR para los datos del mes de abril de 2019 de la estación MG02. Se obtuvo un máximo claro y estable para una frecuencia menor a 1 Hz, lo cual indica la presencia de un reflector a grandes profundidades. . . . .	60

4.20. Recorte de transecta extraída de Miller et al. (2022). La línea amarilla en el mapa indica el segmento de la transecta recortado, el cual es cercano a la estación MG02. Escala vertical en tiempo doble (TWT). . . . . 60

4.21. Modelo inicial de velocidades de onda S para la inversión de curvas H/V de la estación MG02. Los colores indican el valor del error para cada modelo evaluado en la primer iteración, siendo rojo los de menor valor y azul aquellos con mayor error. . . . . 61

4.22. Resultado de la inversión de la curva H/V para el mes de abril de 2019 en la estación MG02. Se obtuvo un modelo de velocidad del subsuelo con un error mínimo de 0.1556. Se aprecia un reflector a 900 metros de profundidad donde existe un gran contraste de impedancia. . . . . 62

# Índice de tablas

2.1. Fuentes de ruido sísmico según la frecuencia (Gutenberg, 1958; Asten, 1978; Asten y Henstridge, 1984). . . . .	15
2.2. Umbral de valores de $\sigma_f$ y $\sigma_A(f_0)$ . Para las dos últimas condiciones de estabilidad, se proporciona una tabla de valores que muestra los límites en los que se deben encontrar $\sigma_f$ y $\sigma_A(f_0)$ dependiendo de la frecuencia $f_0$ . . .	20
3.1. Estaciones sismológicas y período de datos analizados. . . . .	29
4.1. Tabla de criterios para el análisis del máximo de la curva H/V correspondiente a la estación DSPA para el mes de agosto del 2015, según <i>IRIS HVSR Station Toolbox</i> . Este pico cumple con menos criterios que los recomendados, por lo que no se considera un pico claro. . . . .	46
4.2. Tabla de criterios para el análisis del pico de la curva H/V correspondiente al mes de julio del 2016 de la estación MG01, según <i>IRIS HVSR Station Toolbox</i> . Cumple con todos los criterios de claridad por lo que el pico corresponde a la frecuencia fundamental del sitio. . . . .	47
4.3. Tabla de criterios para el análisis del máximo en la curva H/V correspondiente a la estación MG02 para el mes de abril del 2019, según <i>IRIS HVSR Station Toolbox</i> . Cumple con cinco de seis criterios por lo que se puede decir que el pico es la frecuencia fundamental del terreno. . . . .	49
4.4. Criterios de claridad y estabilidad correspondientes a los picos de las curvas H/V de las estaciones GO10 (febrero 2013) y PARE (febrero 2001), según <i>IRIS HVSR Station Toolbox</i> . . . . .	52

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Marco conceptual

El término “sismología” deriva de dos palabras griegas, “seismos” que significa “temblor” y “logos” que significa “ciencia” o “tratado”. La tarea de los sismólogos se centra en el estudio de todos los aspectos de los terremotos, incluyendo sus causas, ocurrencia y propiedades; aunque también se dedican a la evaluación del riesgo sísmico y el trabajo hacia la predicción de terremotos.

La sismología se basa principalmente en la aplicación de los principios de la mecánica de un medio continuo y de la teoría de la elasticidad a los distintos fenómenos. A partir de observaciones de las vibraciones y propagación de las ondas sísmicas dentro de la Tierra junto con otros tipos de datos, amplía el conocimiento sobre la naturaleza de los terremotos, la estructura del interior de la Tierra y sus características dinámicas (Udías, 1999).

El estudio del origen de los terremotos es una de las principales tareas de los sismólogos. Por tanto, la observación de su distribución cumplió un rol fundamental al evidenciar la idea de placas esencialmente rígidas, con deformación concentrada en sus límites (Figura 1.1). La tectónica de placas trata la capa externa de la Tierra como compuesta por alrededor de 15 placas rígidas, de aproximadamente 100 km de espesor, que se mueven unas respecto de otras a velocidades de unos pocos centímetros por año. La deformación ocurre en sus límites, dando lugar a terremotos, formación de montañas, vulcanismo y otros fenómenos.

Existen tres tipos básicos de límites de placas (Figura 1.2). El material caliente del manto asciende en los *centros de expansión*, siendo las dorsales oceánicas las más conoci-

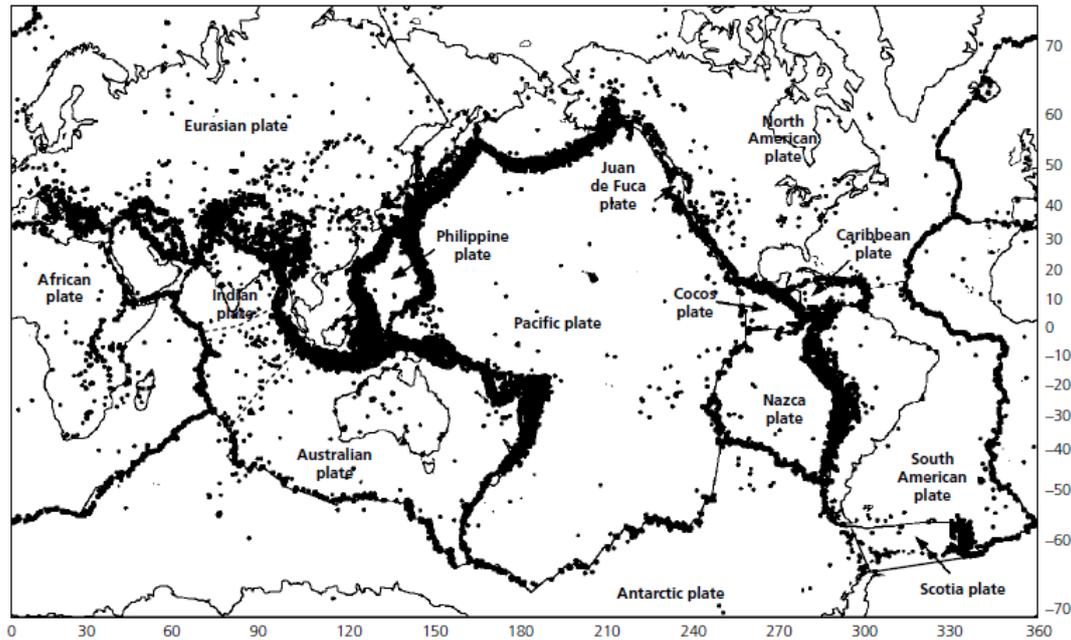


Figura 1.1: Sismicidad global. La distribución de los terremotos evidenció una gran ocurrencia en límites de placas (Stein y Wyssession, 2003).

das, y luego se enfría formando placas fuertes de nueva litosfera. La litosfera oceánica en enfriamiento se aleja de las dorsales hasta alcanzar *zonas de subducción*, o fosas, donde desciende nuevamente al manto, calentándose en el proceso. La naturaleza del límite determina la dirección del movimiento relativo entre dos placas. En los centros de expansión, ambas placas se alejan del límite, mientras que en las zonas de subducción, la placa que subduce se mueve hacia el límite. En el tercer tipo de límite, los *bordes transformantes*, el movimiento relativo de las placas es paralelo al límite (Stein y Wyssession, 2003).

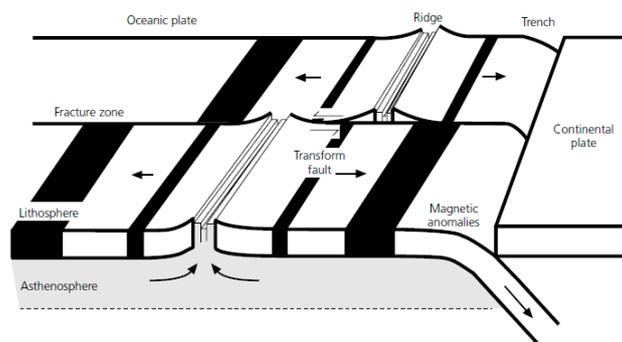


Figura 1.2: Bordes de placa: convergente, donde una placa subduce debajo de otra destruyendo litósfera; divergente, donde las placas se alejan mutuamente y se crea nueva litósfera; y transformante, donde hay movimiento relativo de placas sin destrucción ni creación de litósfera (Stein y Wyssession, 2003).

Para poder analizar todos estos fenómenos en mayor detalle, es necesario interpretar algún registro en el cual el movimiento del suelo quede plasmado. Esa es la función de un *sismograma*.

Las ondas sísmicas se generan en una fuente, que puede ser natural, como un terremoto, o artificial, como una explosión. Las ondas resultantes se propagan a través de la Tierra porque el material en su interior, aunque sólido, puede experimentar deformación interna elástica, y se registran en un sismógrafo. Con un sismograma, registro del movimiento del suelo, se puede obtener información tanto sobre la fuente como sobre el medio analizando las ondas que arriban al receptor. Sabiendo el tiempo de viaje de las ondas se puede determinar su velocidad de propagación y, por ende, las propiedades físicas del medio. Además, debido a que la amplitud y forma de los pulsos de onda se ven afectados durante su propagación, las señales observadas en los sismogramas proporcionan información adicional sobre el medio (Stein y Wysession, 2003).

El movimiento del medio a medida que se propagan las vibraciones puede descomponerse en dos partes, con diferentes comportamientos. Por un lado, el material elástico se expande y contrae manteniendo la misma forma, donde el desplazamiento ocurre en la dirección de propagación. Este tipo de movimiento de onda se denomina “longitudinal”, que en sismología reciben el nombre de ondas P (primarias), ya que son las primeras en ser observadas en los sismogramas. A su vez, el medio cambia de forma, pero no de volumen, generando ondas S (secundarias) donde las partículas se mueven de manera “transversal” a la dirección de propagación, y llegan después de las ondas P por tener velocidades menores (Figura 1.3). Por lo tanto, en un medio elástico infinito, homogéneo e isotrópico, solo existen estos dos tipos de ondas que se llaman *ondas de cuerpo* (Udías, 1999; Stein y Wysession, 2003; Shearer, 2009).

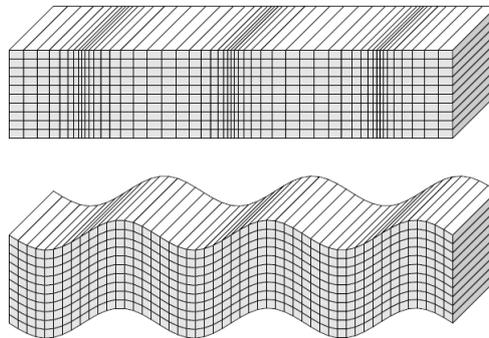


Figura 1.3: Ondas de cuerpo. Arriba: ondas P, donde el material se expande y contrae. Abajo: ondas S, donde el material cambia de forma (Shearer, 2009).

Existen otros tipos de ondas conocidas como *ondas superficiales* que se propagan a lo largo de la superficie terrestre: las ondas Rayleigh y las ondas Love. Su existencia está relacionada con la presencia de una superficie libre, aunque también se ven afectadas por otras superficies de contacto entre capas con propiedades elásticas diferentes.

Para modelos lateralmente homogéneos, las ondas Rayleigh están polarizadas radialmente (P/SV) y existen en cualquier superficie libre, mientras que las ondas Love están polarizadas transversalmente y requieren un aumento de velocidad con la profundidad. Las ondas superficiales difieren de las ondas de cuerpo en muchos aspectos: viajan más lentamente, su decaimiento de amplitud con la distancia generalmente es mucho menor y sus velocidades dependen fuertemente de la frecuencia; todo esto hace que a grandes distancias de la fuente, las ondas superficiales de sismos con foco superficial sean prominentes en los sismogramas (Shearer, 2009; Udías, 1999).

La sismología utiliza diversas técnicas para estudiar el campo de desplazamiento asociado a las ondas elásticas en la Tierra, y a partir de ello infiere la naturaleza de las fuentes sísmicas y de la Tierra misma. Muchas técnicas se basan en la idea de que cualquier serie temporal se puede descomponer en la suma o en la integral de ondas armónicas de diferentes frecuencias, utilizando métodos conocidos como análisis de Fourier. Este concepto es especialmente útil cuando las componentes con diversas frecuencias se comportan de manera diferente. El análisis de Fourier nos permite descomponer la señal en ondas armónicas, considerar cada una por separado y luego recombinar las ondas armónicas.

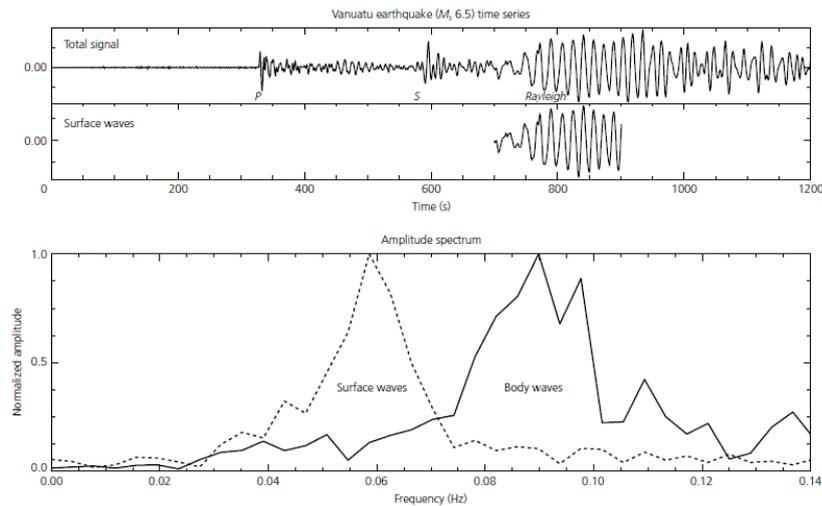


Figura 1.4: Arriba: sismogramas de la componente vertical del movimiento del suelo donde se diferencia la onda superficial Rayleigh del registro total. Abajo: contenido en frecuencia de las ondas. Las ondas de cuerpo predominan en frecuencias mayores, mientras que las ondas superficiales se encuentran a menores frecuencias (Stein y Wysession, 2003).

La amplitud de cada término de Fourier depende de la fuente que generó las ondas, por lo que diferentes ondas pueden ser distinguidas según su contenido en frecuencias (Figura 1.4). En muchas aplicaciones, solo se muestra el espectro de amplitud, ya que indica cómo la energía en la serie temporal depende de la frecuencia (Stein y Wysession, 2003).

Además de captar ondas de cuerpo y ondas superficiales, los sismógrafos registran movimientos del suelo incluso en ausencia de terremotos. Estos movimientos, llamados microsismos o ruido sísmico, son el resultado de muchos factores, incluyendo las mareas solares y lunares en el interior de la Tierra sólida, las fluctuaciones de temperatura y presión atmosférica, las tormentas, las actividades humanas y las olas oceánicas. Estos factores están constantemente en acción, por lo que la corteza terrestre está continuamente vibrando con niveles de ruido que variarán considerablemente entre diferentes lugares y diferentes frecuencias (Shearer, 2009; Stein y Wysession, 2003). Además, como la mayor parte de las fuentes del ruido sísmico están cerca de la superficie, el ruido está compuesto principalmente por ondas superficiales, con mayor energía en el modo fundamental.

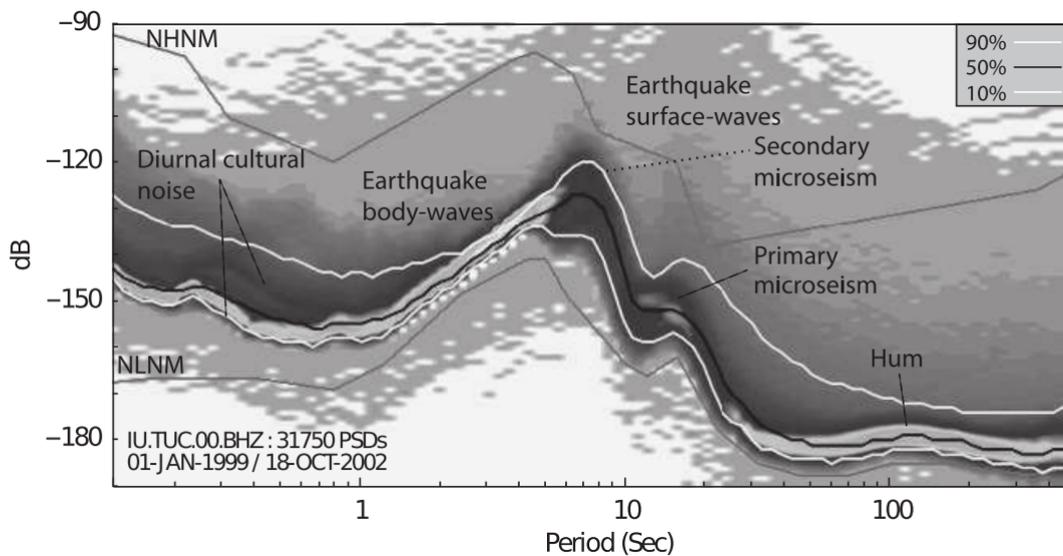


Figura 1.5: Principales componentes presentes en el espectro del ruido sísmico. Con gris oscuro se señalan donde los niveles de potencia del ruido sísmico tiene mayores probabilidades en cada período. Con líneas sólidas se indican las líneas de base estadísticas del 10 %, 50 % y 90 %. NHNM: envolvente superior para períodos ruidosos, NLNM: envolvente inferior para períodos ruidosos. Además, se encuentran indicados los microsismos primario y secundario (McNamara y Boaz, 2019).

Dos picos de ruido importantes ocurren en períodos cercanos a 15 y 7 segundos, denominados picos primario y secundario del microsismo, respectivamente. Sus fuentes invo-

lucran la acción de olas marinas (Figura 1.5). El microsismo primario se genera en aguas someras, donde las olas interactúan con el fondo marino, mientras que el microsismo secundario se debe a ondas estacionarias creadas en alta mar por las interacciones entre las olas oceánicas que viajan en direcciones opuestas. Estos microsismos oceánicos son capaces de propagarse cientos de kilómetros dentro del continente, lo que hace que sus picos de amplitud se observen con mayor intensidad a lo largo de la costa y es más débil en el centro de los continentes (McNamara y Boaz, 2019).

Dentro de las distintas técnicas utilizadas en sismología, el método HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) toma las señales de ruido de las estaciones para estimar la frecuencia fundamental del sitio. La principal condición para su aplicación exitosa es un alto contraste de impedancia entre los sedimentos no consolidados y el basamento rocoso, pero los efectos tridimensionales y las fuertes heterogeneidades pueden impedir su aplicación. Las ventajas del método HVSR son la estimación de la frecuencia de resonancia fundamental de los sedimentos sin necesidad de conocer la estructura geológica ni la velocidad de onda S del subsuelo, y las mediciones simples y de bajo costo (Gosar y Lenart, 2010).

## 1.2. Isla de Tierra del Fuego

La Isla de Tierra del Fuego se sitúa en la parte más austral del continente americano, delimitada al norte por el Estrecho de Magallanes, al sur por el Canal de Beagle, al este por el océano Atlántico y al oeste por el océano Pacífico. Es atravesada por un margen transformante, el cual es el responsable de su escenario tectónico complejo, lo que hace a esta región una zona de gran interés (Figura 1.6). Su superficie de 48.000 km<sup>2</sup> se divide en dos zonas, perteneciendo la zona oeste al territorio chileno y la zona este al territorio argentino.

El Sistema de Fallas Magallanes-Fagnano (SFMF) representa el límite entre los dos bloques continentales generados como consecuencia del movimiento relativo entre las placas Sudamericana y Scotia. Esta gran estructura exhibe características geomorfológicas y topográficas que suelen caracterizar sistemas de transformación a gran escala. Está compuesto por numerosos desplazamientos y diversas fallas subparalelas que sobreyacen en el cinturón de pliegues y corrimientos (Buffoni et al., 2019; Sabbione et al., 2007; Ammirati et al., 2020).

La Falla Magallanes-Fagnano (FMF), que constituye la traza principal del SFMF, es

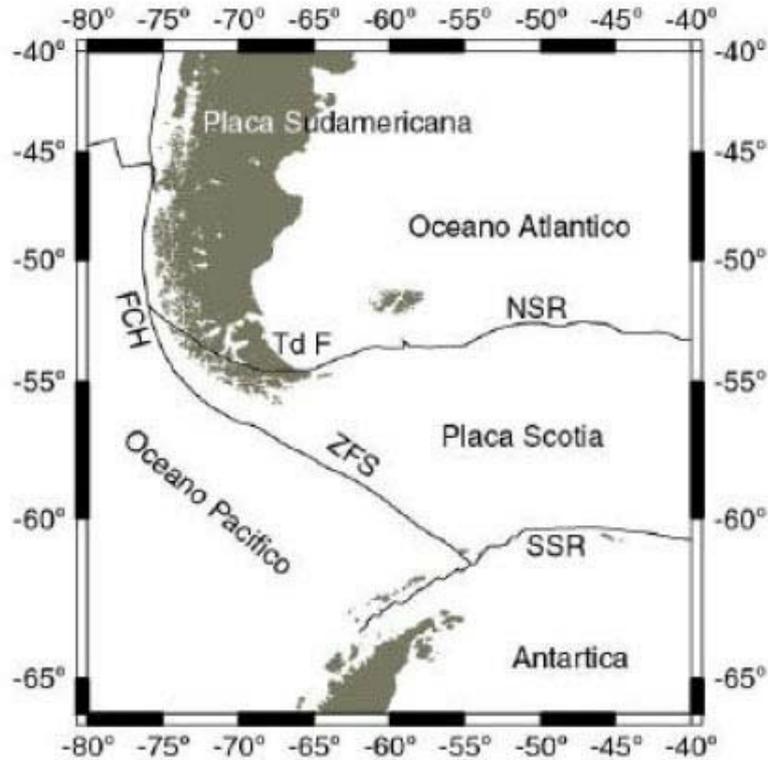


Figura 1.6: Ambiente tectónico en la Isla de Tierra del Fuego. Ubicación de la Isla de Tierra del Fuego (TdF), Fosa Chilena (FCH), Dorsales Norte y Sur del Mar de Scotia (NSR), (SSR) y Zona de Fractura de Shackleton (ZFS) (Febrer et al., 2000; Buffoni et al., 2009)

una falla transcurrente activa con una longitud aproximada de 300 km y que atraviesa la Isla Grande de Tierra del Fuego de oeste a este, en la latitud del Lago Fagnano, dividiendo la isla en dos bloques. El bloque sur se encuentra en la placa de Scotia y se desplaza hacia el este en relación al bloque norte, que se encuentra en la placa Sudamericana. A su vez, la parte sur presenta fuertes evidencias morfológicas de actividad cuaternaria relacionada con el régimen de desplazamiento lateral sinistral, mientras que el área norte está afectada por tectónica extensional asociada a sistemas de fallas normales del Estrecho de Magallanes (Buffoni et al., 2019; Menichetti et al., 2008).

Dentro del SFMF se distinguen cuatro unidades morfoestructurales principales (Figura 1.7) (Olivero y Martinioni, 2001; Menichetti et al., 2008):

- Batolito Patagónico (Patagonian Batholith): compuesto principalmente por rocas plutónicas cretácicas-cenozoicas del archipiélago chileno.
- Cordillera Fueguina: sus picos más importantes se encuentran dentro de la Cordillera

Darwin, Sierra de Sorondo y Sierra de Alvear. Consiste principalmente en esquistos y granitos deformados del Paleozoico-Jurásico, rocas volcánicas del Jurásico Superior, turbiditas y lutitas del Cretácico Inferior de aguas profundas, rocas plutónicas del Cretácico Superior y rocas ofiolíticas del Jurásico Superior.

- Cinturón de pliegues y deslizamientos de Magallanes (Magallanes fold-and-thrust belt): Las laderas de la Cordillera Central consisten en una zona montañosa de altitud relativamente baja que preserva principalmente el cinturón de pliegues y corrimientos del Cretácico superior-Paleógeno más alto de las cuencas de antepaís Austral (o de Magallanes) y Malvinas. En este cinturón orogénico se exponen localmente fragmentos tectónicos de rocas del Cretácico Inferior.
- Antepaís de Magallanes (Magallanes Foreland): llanuras y colinas bajas con afloramientos aislados de rocas del Paleógeno superior-Neógeno de disposición subhorizontal. En su mayoría se encuentran cubiertas por depósitos glaciares y fluvioglaciares del Cenozoico.

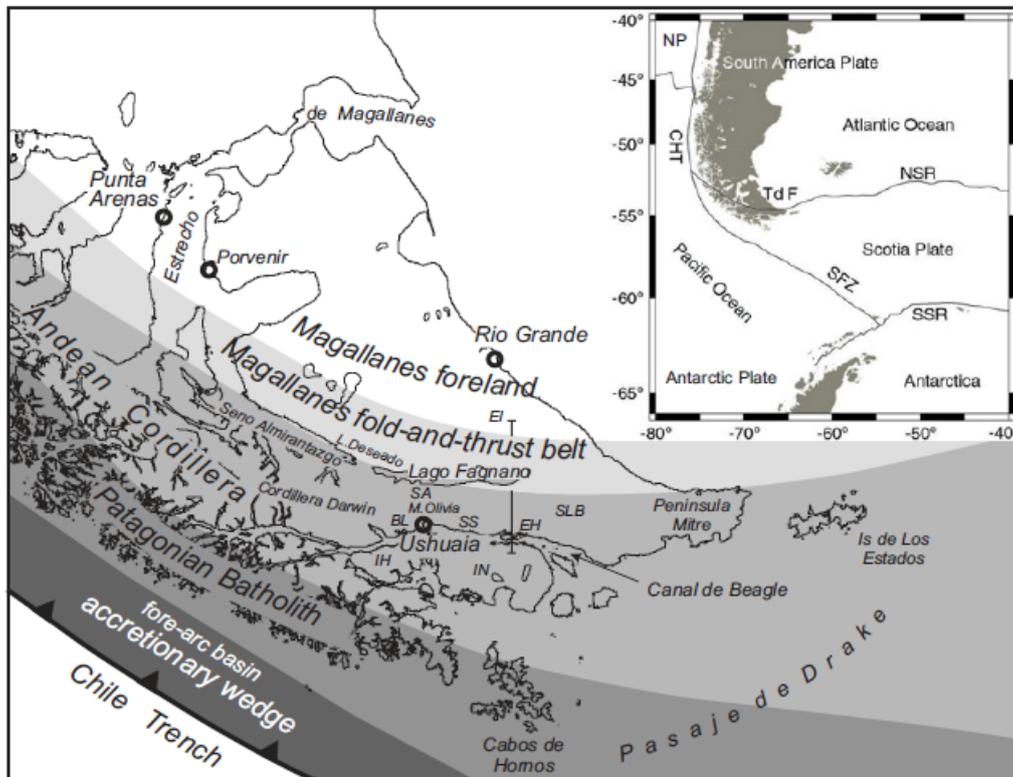


Figura 1.7: Unidades morfoestructurales principales en Tierra del Fuego (Menichetti et al., 2008)

Menichetti et al. (2008) describen cómo esta zona ha sido afectada por al menos tres

regímenes tectónicos complejos:

- un régimen extensional en el Jurásico tardío hasta el Cretácico temprano, con inicio en el desarrollo del rifting que dió lugar a una extensión en el trasarco y una posterior apertura de la cuenca oceánica de trasarco. En este mismo período el arco sufre una rotación dextrógira.
- un régimen compresional desde el Cretácico hasta el Paleoceno, que se relaciona con un período de aumento en la velocidad de convergencia de placas. La subducción comienza a consumir la cuenca marginal y el arco magmático sufre una rotación levógira. Posteriormente, se inicia una colisión entre el continente y el arco, elevándose la Protocordillera Darwin. En el Cretácico medio se cierra completamente la cuenca marginal, dándose el período más importante de deformación y metamorfismo, una veloz tasa de subsidencia, y la depositación en la Cuenca de Magallanes.
- un régimen de deslizamiento desde el Oligoceno que se mantiene en la actualidad, donde se inicia la rotación final del arco y una deformación progresiva del cinturón plegado.

Durante el Neógeno se abre el Pasaje de Drake, lo que independiza a la placa de Scotia (Olivero y Martinioni, 2001), la Dorsal Chilena que separa las placas de Nazca y Antártida subduce oblicuamente bajo la Placa Sudamericana y el Punto Triple de Aysén comienza su migración hacia el norte. En tanto se desarrollan rifts que se mantienen activos hasta la actualidad y cuyas depresiones se encuentran ocupadas por glaciares (Diraison et al., 1997).

En un estudio de acortamiento orogénico, Kraemer (2003) calculó un acortamiento máximo de 600 km y un mínimo de 300 km para el extremo más austral del oroclinal de los Andes Patagónicos. Los principales eventos de deformación compresiva fueron los responsables de este comportamiento. El evento del Cretácico medio produjo un acortamiento máximo de 430 km asociado con metamorfismo regional de alto grado en la Cordillera Darwin y un período de rápida subsidencia en la cuenca de antepaís de Magallanes durante el Cretácico tardío. Los eventos del Cretácico tardío-Cenozoico produjeron un acortamiento máximo de 170 km, de los cuales 40 km corresponden a eventos del Cretácico tardío, 50 km al Paleógeno y 80 km al Neógeno.

### 1.3. Interés sismológico

La Isla de Tierra del Fuego tiene una importante historia sismológica, incluyendo un evento de carácter destructivo de magnitud 7.8 ocurrido en diciembre de 1949. Esta sismicidad es la que ha llevado al INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica) a calificar a la región con peligrosidad entre moderada y elevada. Desde el año 1998 el Departamento de Sismología de la FCAG ha promovido la densificación de la instrumentación sismológica existente en la Provincia de Tierra del Fuego. Esto ha permitido la realización de varios estudios de sismicidad, que en gran medida han despertado el interés de la comunidad internacional en la región. Del análisis de los registros obtenidos, se evidencia una importante sismicidad local de bajo nivel (Figura 1.8). La presencia de una red de estaciones sismológica ha permitido avanzar en el conocimiento de la sismotectónica en el borde de placas Sudamérica-Scotia y aporta información para estudios de riesgo sísmico en la Isla.

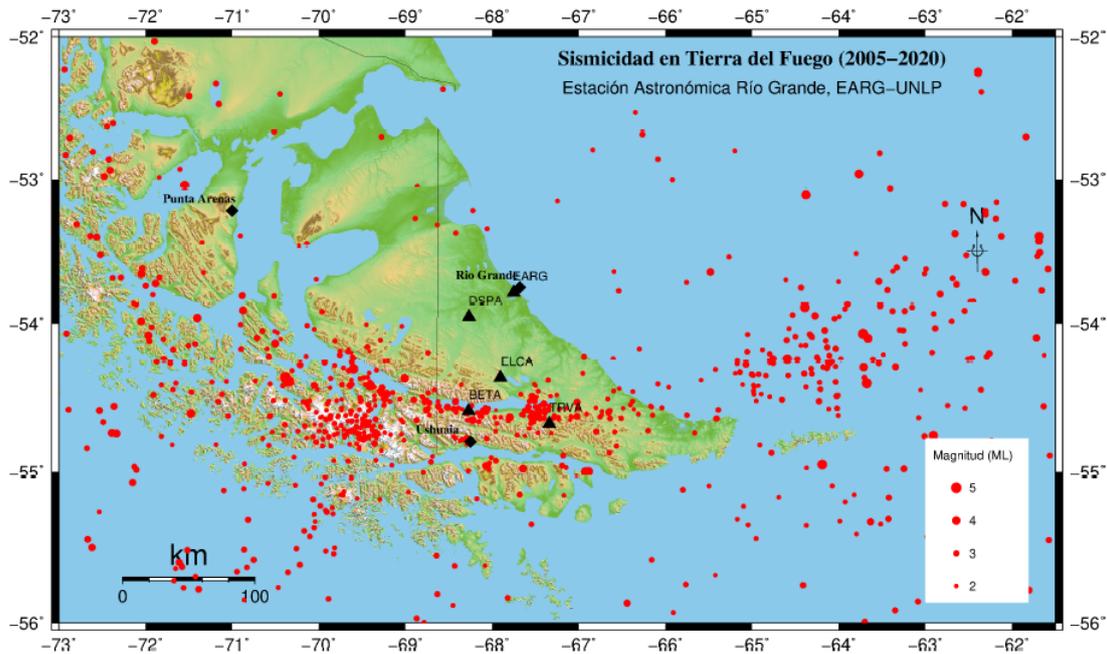


Figura 1.8: Sismicidad de bajo nivel en Tierra del Fuego. Los triángulos negros muestran la ubicación de las estaciones simológicas argentinas (Bollini, 2021).

Febrer et al. (2000) realizó un estudio que permitió detectar y localizar 41 eventos en Tierra del Fuego (TdF), lo que permitió reconocer las localizaciones de epicentros relacionados con el borde transcurrente local y determinar que se libera energía continuamente mediante terremotos de pequeña magnitud. En Sabbione et al. (2007) encontraron además que varios epicentros se ubican en áreas oceánicas. Mientras que Buffoni et al. (2009) con-

firmó la idea de Olivero y Malumian (1999), quienes observaron una correlación entre la distribución de epicentros localizados con zonas de fractura y áreas tectónicamente activas, detectando que los epicentros suelen ubicarse en las zonas aledañas a la FMF, en la Cordillera de Darwin y cerca de la placa de Scotia.

Otro grupo de epicentros, ubicados al sur y sureste de Tierra del Fuego, pudo asociarse con la subducción en el extremo sur de la Fosa de Chile y la sismicidad en el Pasaje de Drake, especialmente en la región conocida como Zona de Fractura Shackleton (Sabbione et al., 2007).

Los estudios realizados por Plasencia et al. (2002) y Febrer (2002) explican la baja detección de eventos por parte de redes internacionales globales debido a que las magnitudes no superan los 4.5 grados.

Buffoni et al. (2019) investigaron la estructura de la corteza debajo de la Isla de Tierra del Fuego mediante el análisis de fuentes receptoras y ruido sísmico. Lograron obtener resultados consistentes y estimar un espesor de corteza que varía desde 24.5 km en la zona norte de la isla hasta 39.2 km en el sur. En el mismo trabajo se concluye que los modelos de velocidades para las ondas S superficiales coinciden con la geología local, resultando en menores velocidades al norte de la FMF y mayores en la parte sur, la cual está compuesta por litologías más antiguas.

Por su parte, Duca (2017) y Duca et al. (2018, 2021), presentaron modelos sísmicos de la Cuenca Austral analizando velocidad de fase de ondas superficiales, determinando la profundidad de la Moho en distintas zonas de la cuenca, mientras que en el sector sur (TdF) encontraron una región más compleja, que no puede modelarse únicamente con datos de dispersión de ondas superficiales. En este contexto el trabajo propuesto permitirá mejorar el conocimiento de la corteza en la región de TdF, a partir de la determinación de la estructura cercana a la superficie mediante la aplicación de HVSR en datos de estaciones sismológicas desplegadas en la región.

## 1.4. Otros Antecedentes

El interés por la zona ha llevado a la realización de varios trabajos de comprensión geológica y estructural, entre los que se destacan Diraison et al. (1997) y Ghiglione et al. (2010); estos últimos analizaron detalladamente las cuencas geológicas de la zona anexando resultados de estudios de flexión litosférica y espesor elástico efectivo. En particular Olivero y Martinioni (2001) publicaron una compilación de diferentes trabajos, destacando las siete unidades estratigráficas principales y sus características.

En Sue y Ghiglione (2016) se presenta una síntesis del sistema de fallas asociado a las principales zonas de falla en los Andes Fueguinos y el Mar de Scotia. Los resultados del análisis de magnitud y dirección de los acortamientos confirman el movimiento lateral izquierdo entre las placas de Antártida, Scotia y Sudamérica. La compleja mecánica del SFMF queda en evidencia con la discrepancia entre el intervalo esperado entre terremotos de magnitud 8 ( $\approx 10.000$  años) y el tiempo entre los dos terremotos más recientes de magnitud mayores a 7 ( $\approx 70$  años).

Por otro lado, varias técnicas GNSS fueron aplicadas para estudiar el comportamiento de los hielos patagónicos, mostrando deformaciones rápidas en la componente vertical debido al rebote isostático post glacial. Las deformaciones horizontales tendrían su origen en tres procesos: la elevación isostática glacial, la subducción de placas, y una deformación extensional relacionada con la tectónica activa patagónica (Richter et al., 2016). Un estudio posterior por Richter et al. (2019) reveló que no se muestran indicios de una aceleración en la pérdida de masa de hielos patagónicos pero que el Campo de Hielo Patagónico Norte contribuye más a la pérdida integral de hielo de lo que se había asumido previamente.

Otro tipo de técnica aplicada en la zona fueron observaciones GPS con el objetivo de comprender las deformaciones a lo largo de la SFMF. El resultado del análisis de tensiones detectó que la zona de mayor deformación se encuentra a lo largo de la traza principal del sistema de fallas, con un abrupto cambio en el estilo de deformación, pasando de transtensión del este a transpresión al oeste (Mendoza et al., 2011). Un estudio posterior en Mendoza et al. (2022) integró observaciones GNSS con datos geológicos y sismológicos para comprender mejor la deformación actual de la corteza asociada a la FMF.

## 1.5. Motivación

La ocurrencia de terremotos, su distribución espacio-temporal, el mecanismo y la liberación de energía ponen de manifiesto los procesos dinámicos activos en la Tierra. El estudio de la propagación de las ondas sísmicas permite revelar la estructura del interior terrestre. Entender esta estructura es fundamental en estudios vinculados a analizar las catástrofes naturales y en consecuencia a proponer herramientas para su mitigación, siendo esencial para cualquier interpretación sismológica.

Para obtener los parámetros de la geología local, como pueden ser composiciones y espesores de capas superficiales, resultan de gran interés métodos pasivos basados en el análisis de ruido sísmico. No solo tienen la ventaja de ser métodos que no requieren altos

costos para poder ser aplicados, si no que también permiten estudios en zonas urbanas donde no es posible realizar estudios más invasivos.

El método HVSR, propuesto por Nakamura (1989) demostró ser una de las técnicas más convenientes para estimar frecuencias fundamentales de depósitos. Se basa en la suposición de que la componente horizontal del movimiento del suelo puede amplificarse durante la propagación de ondas sísmicas cerca de la superficie, mientras que la amplificación en la componente vertical es relativamente pequeña. Para ello se calcula la relación entre los espectros horizontal y vertical de las vibraciones registradas en un sensor sísmico de tres componentes. Los picos en la curva HVSR están asociados con las frecuencias de resonancia del sitio, por lo que tener contrastes de impedancia a diferentes profundidades conduce a múltiples picos.

En conjunto con otras técnicas, el método HVSR se aplica para caracterizar efectos de sitio y realizar investigaciones de microzonificación sísmica, recomendando su aplicación en áreas de sismicidad baja a moderada.

## 1.6. Objetivos

El objetivo de este trabajo es avanzar en el conocimiento de la estructura sísmica de la región sur de la Patagonia para investigar acerca de su evolución y su actual geodinámica. La zona de aplicación es de particular interés ya que la Isla de Tierra del Fuego posee una importante historia sismológica.

En particular se propone el estudio de la estructura cortical cercana a la superficie mediante la aplicación de la técnica HVSR. Para ello se analizará esta relación en función de la frecuencia y se obtendrán, por inversión, modelos sísmicos debajo de las estaciones. Este estudio nos permitirá mejorar los modelos de la región obtenidos por análisis de dispersión y de función del receptor, mostrando así una mejor correlación espacial con las características tectónicas conocidas y aportar información para estudios de riesgo sísmico en la Isla.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Relación H/V

La técnica conocida como HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) implica calcular la relación entre los espectros horizontal y vertical de las vibraciones registradas en un sensor sísmico de tres componentes. Los picos en la curva H/V están asociados con las frecuencias de resonancia del sitio, por lo que tener contrastes de impedancia a diferentes profundidades conduce a múltiples picos. El análisis de esta relación es una herramienta poderosa para investigar la estructura local directamente debajo de la estación de registro. HVSR ha demostrado ser muy conveniente para estimar la frecuencia fundamental de los sedimentos y tener un buen conocimiento de las propiedades del suelo local, es decir, las velocidades de onda S y el espesor de esos sedimentos.

La frecuencia y amplitud del pico principal se utilizan ampliamente en la exploración sísmica como una herramienta para la detección rápida y evaluación de los efectos de amplificación sísmica en términos de la frecuencia de resonancia de ondas S. Existen muchos debates sobre la interpretación física exacta de los resultados de esta técnica. La mayoría de ellos se refieren a la naturaleza del campo de ondas de vibración ambiente y sus fuentes.

El método hace uso de señales sísmicas que contengan arribos de terremotos o ruido sísmico, pequeñas vibraciones dentro del rango de frecuencias de 0.5 Hz a 100 Hz. Una de sus principales ventajas es que puede ser aplicado en cualquier momento, sin restricción de lapsos de tiempo, lo que permite realizar mediciones dentro de cortos períodos y en múltiples puntos.

Existen dos orígenes distintos de ruido sísmico que determinarán su comportamiento y su efecto en la relación H/V: natural (microsismos) y cultural (microtremors). Alrededor

de 1 Hz se encuentra el límite espectral entre ellos, aunque puede variar dependiendo de la geología, desplazándose hacia frecuencias más altas. Las amplitudes de los microtremors tienen variaciones diarias y semanales, mientras que el ruido natural muestra variaciones de amplitud relacionadas con fenómenos naturales, comúnmente con la actividad oceánica (Bonney-Claudet et al., 2006).

Los diferentes tipos de orígenes permiten clasificar al ruido sísmico de la siguiente manera (Tabla 2.1): 1) el ruido sísmico por debajo de 0.5 Hz se genera por condiciones oceánicas y meteorológicas a gran escala; 2) el ruido en frecuencias alrededor de 1 Hz se debe a efectos del viento y condiciones meteorológicas locales; 3) por encima de 1 Hz, el ruido sísmico se debe a actividades humanas (Bonney-Claudet et al., 2006).

	Gutenberg (1958)	Asten (1978,1984)
Olas oceánicas golpeando a lo largo de las costas	0.05 – 0.1 Hz	0.5 – 1.2 Hz
Perturbaciones meteorológicas a gran escala	0.1 – 0.25 Hz	0.16 – 0.5 Hz
Ciclones sobre los océanos	0.3 – 1 Hz	0.5 – 3 Hz
Condiciones meteorológicas a escala local	1.4 – 5 Hz	
Tremor volcánicos	2 – 10 Hz	
Urbano	1 – 100 Hz	1.4 – 30 Hz

Tabla 2.1: Fuentes de ruido sísmico según la frecuencia (Gutenberg, 1958; Asten, 1978; Asten y Henstridge, 1984).

La técnica HVSR fue popularizada por Nakamura (1989), quien se basó en la suposición de que la componente horizontal del movimiento del suelo puede amplificarse durante la propagación de ondas sísmicas cerca de la superficie, mientras que la amplificación en la componente vertical es relativamente pequeña.

Se ha demostrado en diferentes trabajos que si se toma la relación entre los espectros de amplitud de las componentes horizontal y vertical del suelo, y esta posee un pico bien definido de amplitud, aquel de menor frecuencia permitirá obtener una buena aproximación de la frecuencia fundamental  $f_0$ , la cual es representativa de la propagación de las ondas sísmicas a través de sus capas del subsuelo.

Si fuera posible medir las ondas en el basamento y en superficie se podría calcular

la función de transferencia empírica de los registros, que resulta del cociente entre los espectros de amplitud de estas dos señales. La frecuencia fundamental  $f_0$  es el pico de menor frecuencia que se puede observar en esta curva. Mientras que no se discute que la curva H/V permite estimar  $f_0$ , todavía no existe un acuerdo global acerca del significado de la amplitud del pico de la curva. Nakamura (1989) en un primer momento planteó que la curva H/V se asemeja a la función de transferencia del movimiento horizontal. Posteriormente, surgieron varios debates acerca de su significado. Algunos autores afirman que la curva se relaciona con la función de transferencia de la onda SH (Nakamura, 1989; Herak, 2008); otros que se relaciona con las ondas Rayleigh (Lermo y Chávez-García, 1994; Fäh et al., 2001; Arai y Tokimatsu, 2004; Malischewsky y Scherbaum, 2004; Tuan et al., 2011); otros, que surge de una combinación de ondas superficiales (Van der Baan, 2009) o que se relaciona con el campo de ondas total (Bonney-Claudet et al., 2008).

### 2.1.1. Técnica HVSR

El contraste de impedancia en la interfaz sedimento-basamento tiene una fuerte influencia en la forma de la curva H/V. La frecuencia del pico H/V en sitios que presentan un alto contraste se acerca a la frecuencia de resonancia fundamental del sitio y el valor de ese pico está relacionado con el factor de amplificación del sitio. Para estos casos varios autores, entre ellos Tuan et al. (2015), obtuvieron un procedimiento que permite calcular el espesor a partir de la frecuencia pico de la curva. Este tipo de análisis es muy útil porque puede revelar las principales características estructurales debajo de las estaciones sísmicas, siendo de interés para estudios de riesgo sísmico y/o diseño sísmico, ya que proporciona modelos terrestres locales en el rango de profundidades de la corteza.

Para poder aplicar la técnica primero se debe contar con un instrumento capaz de medir movimientos muy débiles del suelo y dejarlo en funcionamiento en el sitio el tiempo requerido según las condiciones de la zona donde está ubicada la estación. Es recomendable realizar mediciones durante períodos de tranquilidad, comúnmente la noche, para evitar señales originadas por la actividad industrial, si los hubiera localmente.

Los sensores de 3 componentes entregan tres señales: Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical. A estas tres señales se las acota en el intervalo de tiempo que se quiera estudiar, como por ejemplo una hora, y se procede a dividir las observaciones en pequeñas ventanas de menor longitud, de 30 a 120 segundos. Durante el ventaneo se deben aplicar tapers que disminuyan los efectos de borde en el dominio de las frecuencias generados por cortes abruptos en las señales temporales. El siguiente paso es calcular la transformada de Fourier de cada

ventana para obtener los espectros de amplitud. Se suele aplicar filtros suavizadores a los espectros antes de continuar con el procesamiento de modo tal que los patrones importantes destaquen. Comúnmente se utiliza el filtro de Konno y Ohmachi (1998), quienes proponen una función de ventana logarítmica para realizar el suavizado de la curva y es recomendado ya que tiene en cuenta el número diferente de puntos a bajas frecuencias.

La componente horizontal utilizada en el cálculo de la relación H/V se obtiene de la combinación de las componentes NS y EO. Existen varias formas de hacerlo, entre las que se encuentran:

$$\begin{aligned}
 \text{Media aritmética:} & \quad (H_N + H_E)/2 \\
 \text{Media geométrica:} & \quad \sqrt{H_N H_E} \\
 \text{Suma vectorial:} & \quad \sqrt{H_N^2 + H_E^2} \\
 \text{Media cuadrática:} & \quad \sqrt{(H_N^2 + H_E^2)/2} \\
 \text{Valor máximo:} & \quad \max(H_N, H_E)
 \end{aligned}$$

Esta combinación de componentes se realiza en cada ventana individual para luego tomar la relación entre el espectro de la componente vertical respecto del espectro horizontal. Esto significa que se tiene una curva H/V por ventana.

Los programas que se utilizan para el procesamiento detectan automáticamente los picos de mayor amplitud y sus frecuencias en cada una de las ventanas, lo que permite realizar cálculos estadísticos según su distribución. Al promediar todas estas curvas se obtiene la curva H/V final junto con la desviación estándar de amplitudes y frecuencias para cada pico. Desviaciones pequeñas implican que las curvas individuales se asemejan y permitirán una mejor determinación de la curva media y por lo tanto de la frecuencia del pico.

Un ejemplo de procesamiento HVSR se puede ver en la Figura 2.1. Se muestra la curva H/V con trazo grueso junto a dos curvas de trazo fino o segmentado que consideran la desviación estándar de amplitud. Observando la curva, se identifica la existencia de un máximo de amplitud, cuya frecuencia se analizará si corresponde a la frecuencia fundamental del sitio. Además, se suele marcar una zona de frecuencias, en este caso una franja gris, centrada en la frecuencia media del pico obtenida del promedio de las ventanas, y sumando y restando la desviación estándar de la frecuencia.

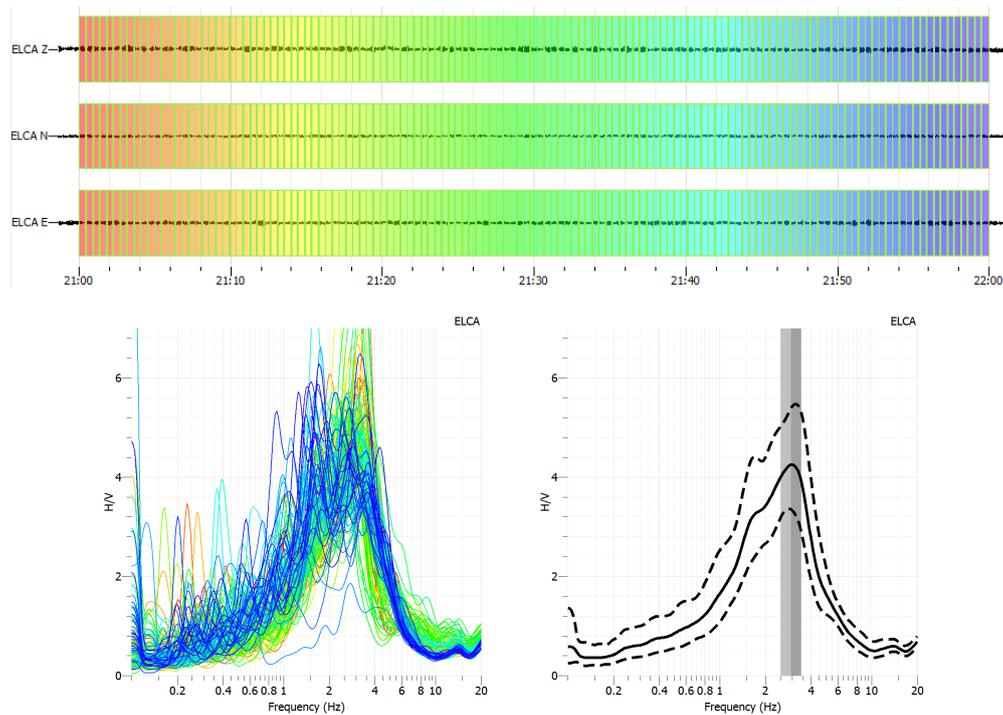


Figura 2.1: Procesamiento HVSR para la estación ELCA el 20 de julio del 2008 a las 21hs UTC. Arriba: elección de intervalo temporal total de una hora y ventaneo de 30 segundos; abajo: a la izquierda curvas H/V para cada ventana y a la derecha curva H/V final con resultados estadísticos. La curva negra de trazo grueso muestra el resultado de promediar las curvas H/V de cada ventana, mientras que las curvas segmentadas consideran la desviación estándar de amplitud. La franja gris se centra en la frecuencia fundamental media y su ancho está definido por la desviación estándar de frecuencias.

## Control de resultados

La principal información que se desea de la relación H/V es la frecuencia fundamental de los depósitos, correspondiente al pico de la curva. Si bien no es claro el significado de la amplitud de la curva, como ya se mencionó, puede considerarse indicativa de los contrastes de impedancia en el sitio de estudio: los valores altos de H/V generalmente se asocian con contrastes de velocidad agudos.

Antes de interpretar los picos de la curva es necesario controlar si estos son claros y confiables. El proyecto SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations) propuso criterios de confiabilidad, claridad y estabilidad que permiten asegurar que un máximo de la curva H/V representa el comportamiento del subsuelo (Mucciarelli y Gallipoli, 2001).

La “confiabilidad” se refiere a si las señales sísmicas procesadas permiten analizar correctamente la zona elegida. Una curva confiable implica que hubiera sido posible obtener

la misma curva utilizando otras mediciones en la zona u otro ventaneo temporal. Por lo tanto, un análisis de confiabilidad significa realizar un control de los parámetros del procesamiento, tales como frecuencia de muestreo, longitud de ventanas, etc.

El concepto de “claridad” está relacionado con la amplitud del pico H/V y su valor relativo con respecto a las amplitudes en otras bandas de frecuencia. La claridad implica que el pico tiene una amplitud y un ancho en frecuencia que lo hacen distinguible en la curva H/V.

La “estabilidad” se refiere al valor relativo de la desviación estándar de amplitud  $\sigma_A(f)$  y de frecuencia  $\sigma_f$  de los valores de  $f_0$  de las ventanas individuales. Es decir, se espera que las desviaciones sean pequeñas, y por lo tanto que las ventanas individuales presenten máximos en frecuencias cercanas a  $f_0$ .

Por último, la propiedad de “único” se relaciona con el hecho de que, en ninguna otra banda de frecuencia, la amplitud H/V exhiba otro pico “claro” que cumpla con los mismos criterios.

A continuación se detallan los criterios dados por SESAME que deben cumplir las curvas H/V y los picos observados:

Criterios de confiabilidad:

1.  $f_0 > 10/l_w$ , donde  $l_w$  es la longitud de la ventana. Esta condición se propone para que, en la frecuencia de interés, haya al menos 10 ciclos de medición significativos en cada ventana.
2.  $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$ , donde  $l_w$  es la longitud de la ventana,  $n_w$  es la cantidad de ventanas con las que se promediará la curva H/V, y  $n_c$  es el número total de ciclos significativos. Se necesita un gran número de ventanas y ciclos. Se recomienda que, al usar la selección automática de ventanas con parámetros predeterminados,  $n_c$  sea mayor a 200.
3.  $\sigma_A(f) < 2$  para  $0,5f_0 < f < 2f_0$  si  $f_0 > 0,5Hz$  o  $\sigma_A(f) < 3$  para  $0,5f_0 < f < 2f_0$  si  $f_0 < 0,5Hz$ , siendo  $\sigma_A(f)$  la desviación estándar de  $A_{H/V}(f)$ . Este criterio refiere a que se necesita un nivel aceptablemente bajo de dispersión entre todas las ventanas. Grandes valores de desviación estándar significan que las vibraciones ambientales no son estacionarias y experimentan algún tipo de perturbación, lo que puede afectar el significado físico de la frecuencia pico H/V.

Se espera que la curva H/V cumpla con los tres criterios de confiabilidad. En caso de que cierto procesamiento no lleve a resultados satisfactorios se recomienda volver a

procesar con otros parámetros. En algunos casos la única forma de resolver problemas de confiabilidad implica volver al sitio y realizar nuevas mediciones de mayor duración y/o con condiciones experimentales más controladas.

Criterios de claridad:

1. Existe una frecuencia  $f^-$ , entre  $f_0/4$  y  $f_0$ , tal que  $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
2. Existe otra frecuencia  $f^+$ , entre  $f_0$  y  $4 f_0$ , tal que  $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
3.  $A_0 > 2$ , donde  $A_0$  es la amplitud correspondiente a la frecuencia  $f_0$ .

Criterios de estabilidad:

4.  $f_{pico}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$  : el pico debería aparecer a la misma frecuencia (dentro de un porcentaje de  $\pm 5\%$ ) en las curvas H/V que consideran la desviación estándar.
5.  $\sigma_f < \epsilon(f_0)$  :  $\sigma_f$  debe ser menor que un umbral dependiente de la frecuencia  $\epsilon(f)$  (Tabla 2.2).
6.  $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$  :  $\sigma_A(f_0)$  debe ser menor que un umbral dependiente de la frecuencia  $\theta(f)$  (Tabla 2.2).

Los seis criterios controlan que el máximo la curva H/V posea una amplitud que permita reconocerlo, que la amplitud en sus alrededores disminuya significativamente, y que se encuentre en gran cantidad de las curvas H/V de las ventanas individuales. Si las curvas H/V para un sitio dado cumplen al menos 5 de estos 6 criterios de claridad, entonces el valor  $f_0$  se considera una estimación muy confiable de la frecuencia fundamental. Si, además, la amplitud máxima del pico  $A_0$  es mayor que 4 o 5, es muy probable que exista una discontinuidad abrupta con un gran contraste de velocidad a cierta profundidad.

Rango de frecuencias [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\epsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.20 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ para $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58

Tabla 2.2: Umbral de valores de  $\sigma_f$  y  $\sigma_A(f_0)$ . Para las dos últimas condiciones de estabilidad, se proporciona una tabla de valores que muestra los límites en los que se deben encontrar  $\sigma_f$  y  $\sigma_A(f_0)$  dependiendo de la frecuencia  $f_0$ .

## Interpretación de resultados

A modo de ejemplo se detallan posibles resultados que pueden obtenerse luego de aplicar la técnica HVSR y sus respectivas interpretaciones.

### Pico claro

Si la curva H/V obtenida cumple entre cinco y seis criterios de claridad, significa que el pico observado es apto para interpretación (Figura 2.2). Se considera que se trata de un sitio con presencia de un alto contraste de impedancia a cierta profundidad tal que genere una amplificación del movimiento del suelo. El valor de  $f_0$  será la frecuencia fundamental del sitio.

Si se conoce el espesor local, se puede estimar la velocidad media de la onda S en la capa superficial; y si, caso contrario, se conoce un estimativo de la velocidad, se puede estimar el espesor.

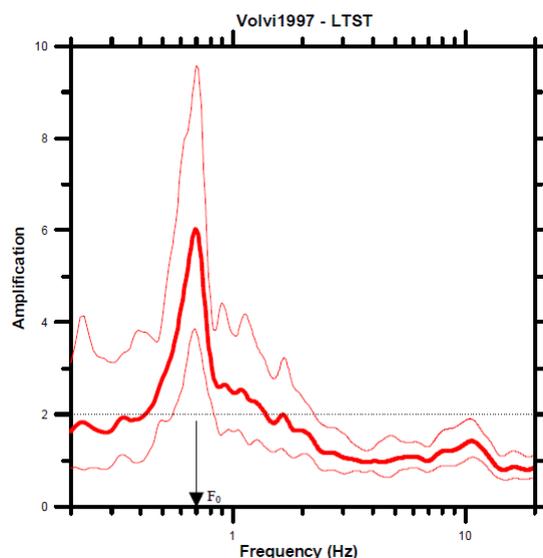


Figura 2.2: Ejemplo de curva H/V con un único pico claro. En esta situación es posible obtener una estimación de la frecuencia fundamental del suelo (Marcellini, 2006).

### Dos picos claros

Cuando existan dos frecuencias con picos claros (Figura 2.3) donde ambos cumplen suficientes criterios de claridad, es probable que la velocidad de la superficie sea baja, que el basamento esté compuesto por roca muy dura, y que existan dos contrastes grandes de impedancia en dos escalas diferentes. Se considera que cada pico representa una amplificación a diferentes profundidades, y que el pico de menor frecuencia es la frecuencia fundamental del sitio.

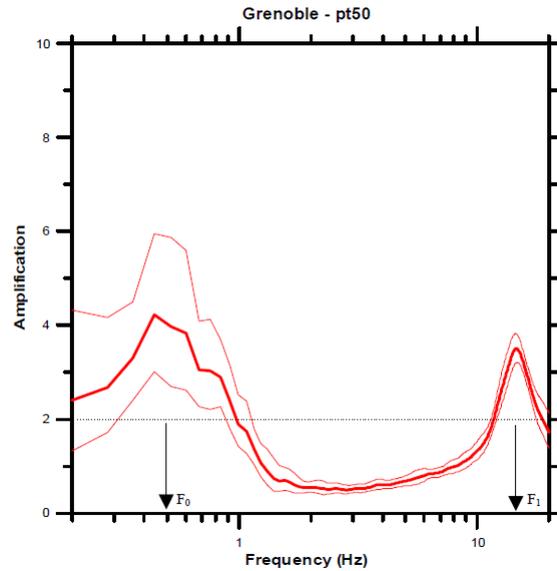


Figura 2.3: Ejemplo de curva H/V con dos picos claros. En este caso se considera el pico de menor frecuencia como el estimativo de  $f_0$  (Marcellini, 2006).

### Pico de origen industrial

En las cercanías de zonas urbanas suele ocurrir que las curvas H/V muestren picos o valles estrechos locales (Figura 2.4). En la mayoría de los casos se tratan de picos de origen antropogénico (normalmente industrial), relacionado con algún tipo de maquinaria (turbina, generadores, etc.). Estas curvas deben descartarse por completo.

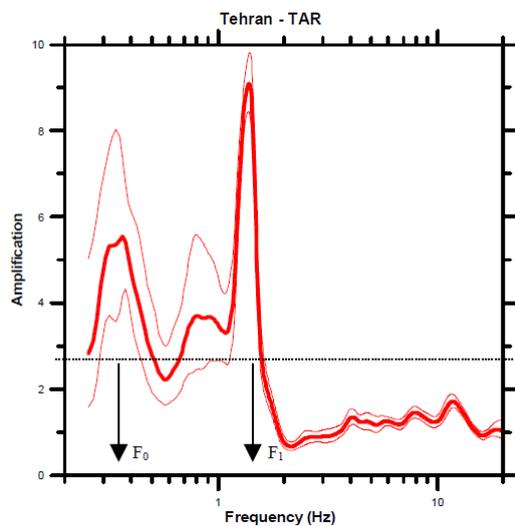


Figura 2.4: Ejemplo de curva H/V con pico de origen industrial. Estos casos alteran significativamente la estimación de la frecuencia fundamental del sitio por lo que, en caso de no poder corregirse, deben descartarse (Marcellini, 2006).

Se reconocen por dos características generales: existen sobre un área significativa (se observan a varios kilómetros desde su fuente) y como su fuente es “permanente” (al menos dentro de las horas de trabajo), los espectros de Fourier originales (no suavizados) presentan picos agudos.

Puede ocurrir que la frecuencia de origen industrial sea cercana a una frecuencia de sitio real. Estos casos alteran la estimación de la frecuencia real del sitio  $f_0$ . Se recomienda realizar mediciones fuera de las horas de trabajo para evitar este tipo de pico, o aplicar filtros de rechazo de banda a los registros para eliminar totalmente efectos semejantes.

### Pico no claro de baja frecuencia

Cuando se encuentra un máximo de baja amplitud y en frecuencias menores a 1Hz, no es recomendable realizar interpretaciones cuantitativas de la curva H/V (Figura 2.5). Si esta observación se mantiene en varias lecturas dentro del mismo área, y si la estación sismológica se encuentra sobre rocas sedimentarias poco consolidadas, entonces se recomienda realizar más mediciones para obtener mejores lecturas de las bajas frecuencias. Es posible que existan amplificaciones en bajas frecuencias.

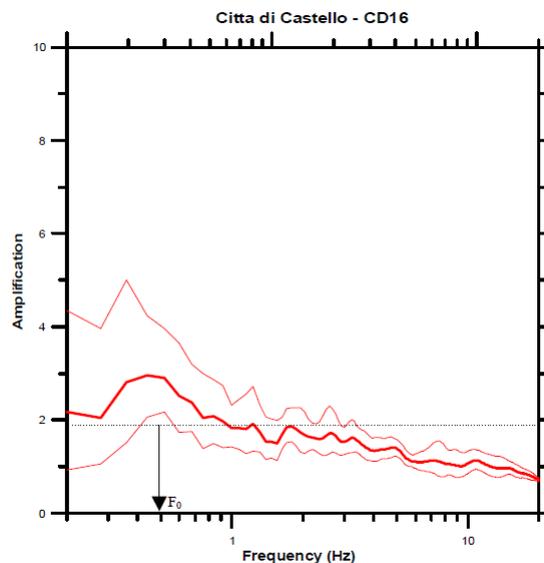


Figura 2.5: Ejemplo de curva H/V con un pico no claro de baja frecuencia. En estos casos es necesario analizar registros en zonas aledañas y controlar las condiciones meteorológicas durante la medición (Marcellini, 2006).

Las siguientes pruebas sirven de guía para verificar si el pico de baja frecuencia “poco claro” es realmente una característica del sitio:

- Considerar la geología del sitio: si está sobre roca, es probable que el pico sea espurio;

si se trata de depósitos sedimentarios, pueden existir efectos de baja frecuencia, ya sea debido a capas superficiales muy blandas o a depósitos rígidos pero gruesos.

- Consultar los boletines meteorológicos correspondientes al período de registro y las fichas de campo de medición. Algunas condiciones meteorológicas (viento, tormentas, movimiento de árboles) pueden aumentar el contenido en bajas frecuencias.
- Comprobar la asíntota de baja frecuencia (valor límite de la relación H/V cuando la frecuencia es cercana a cero): si el valor asíntótico es significativamente mayor que 2, es probable que sean señales de baja frecuencia debido al viento, al tráfico o a un sensor defectuoso.
- Comprobar la frecuencia de corte del sensor utilizado ya que puede ser poco sensible a señales de baja frecuencia.

### Pico ancho o múltiples picos

La curva puede presentar un pico ancho o múltiples picos donde no se cumplen los criterios de claridad (Figura 2.6). En estos casos, es necesario revisar el procesamiento de las curvas, aunque rara vez se soluciona el problema de la claridad.

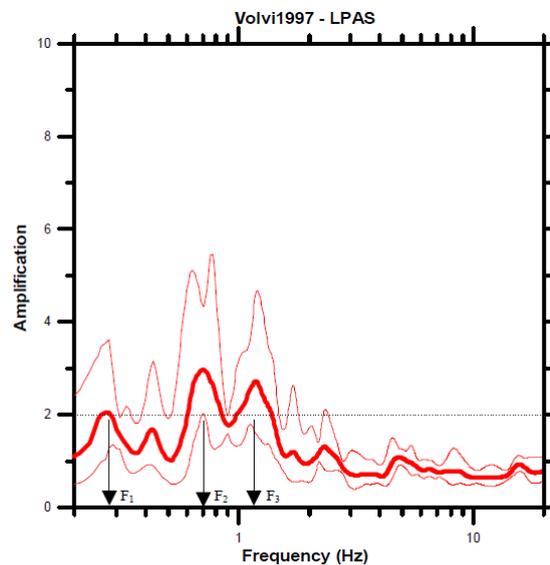


Figura 2.6: Ejemplo de curva H/V con múltiples picos que no cumplen con suficientes criterios de claridad. Este caso no se considera apto para interpretación directa. Se recomienda revisar el procesamiento y curvas en zonas cercanas (Marcellini, 2006).

A pesar de eso, existe la posibilidad de que el máximo ancho se deba a la presencia de una interfaz buzante en profundidad, que separe una capa de material blando de otra de

composición dura. Se recomienda revisar mediciones en zonas cercanas para asegurarse si existen picos más claros y si se ubican dentro del ancho de banda inicial. Si esto ocurre, hay grandes posibilidades de que la estructura subterránea del sitio muestre variaciones laterales significativas, lo que conduce a efectos 2D o 3D.

Si la curva muestra amplitudes muy diferentes a 1 para un gran ancho de banda, es muy probable que las medidas contengan errores (mal funcionamiento en el sensor o en el sistema de registro) o que existan fuentes artificiales muy fuertes y cercanas. En este caso, las mediciones deben ser realizadas nuevamente.

### Curva plana

En casos donde la curva no contenga máximos significativos (Figura 2.7), es muy probable que la estructura subterránea local no presente un fuerte contraste de impedancia a ninguna profundidad.

Si la estación se encuentra sobre depósitos sedimentarios, obtener una curva plana no significa necesariamente que no exista amplificación en el sitio. No se debe interpretar la curva H/V plana como un área sin efectos de sitio. Esto solo se puede hacer si la estación se encuentra sobre roca poco meteorizada.

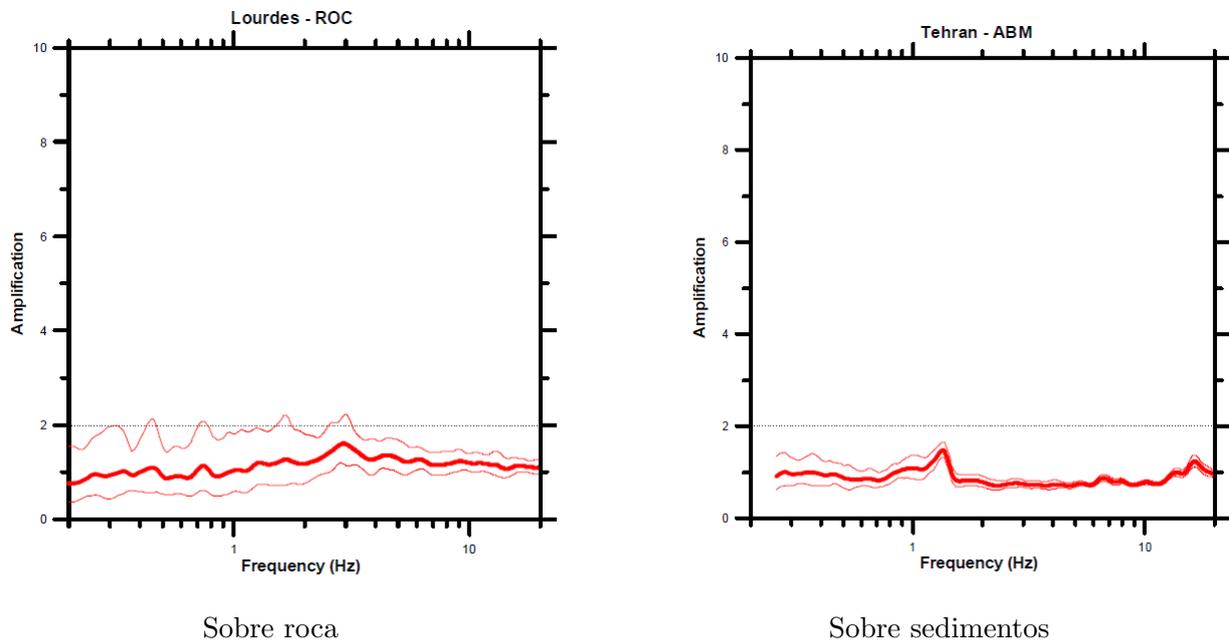


Figura 2.7: Ejemplos de curva H/V plana. Se muestran casos donde la estación sismológica se encuentra sobre roca y sobre sedimentos. Debe considerarse la posibilidad de que no existan grandes contrastes de impedancia en profundidad (Marcellini, 2006).

## 2.2. Problema inverso

El proceso de inversión tiene como objetivo buscar el mejor modelo cuya respuesta directa se ajuste bien a los datos observados y se basa en la definición y minimización de la función de costo del problema. Los problemas de inversión en geofísica son altamente no lineales y ambiguos debido a la falta de unicidad en las soluciones, siendo varios modelos los que lo resuelven.

Su implementación requiere de la descripción de un modelo inicial del suelo mediante una serie de parámetros físicos y mecánicos vinculados a los datos observados, los cuales se modifican buscando minimizar el error del ajuste.

Como fue descrito, el objetivo de la técnica HVSR es encontrar la frecuencia fundamental del sitio a través de la curva H/V. Esta frecuencia se corresponde con un contraste de impedancia en algún nivel del subsuelo. Cuanto más alta sea la frecuencia fundamental, más somero será el horizonte que da origen al máximo de la curva H/V (Gabas et al., 2014).

La técnica HVSR de Nakamura propone una solución al problema inverso: a partir de la frecuencia fundamental  $f_0$  es posible determinar la profundidad donde se encuentra el contraste de impedancia. La frecuencia y el espesor están relacionados según

$$f_0 \approx \frac{V_S}{4h} \quad (2.1)$$

donde  $V_S$  es la velocidad superficial de la onda S y  $h$  es el espesor de la capa.

Resolver el problema inverso de la técnica HVSR implica contar con un buen modelo de velocidades en la zona con el cual calcular profundidades. En caso contrario, se requerirá acceso a datos de pozo o estudios de espesores para el cálculo de velocidades superficiales.

Ibs-von Seht y Wohlenberg (1999) demostraron que la frecuencia fundamental del suelo está relacionada con el espesor de su capa a través de la relación potencial

$$h = a f_0^b \quad (2.2)$$

donde  $a$  y  $b$  son los parámetros que se obtienen del ajuste potencial entre datos de profundidades y frecuencias estimadas con curvas H/V.

Esta última expresión (Eq 2.2) tiene la ventaja de permitir realizar una primera aproximación de espesores sin necesidad de conocer la velocidad de la onda S. La certeza de las estimaciones dependerá de los parámetros  $a$  y  $b$  obtenidos del ajuste potencial de los datos.

Varios autores, como Tuan et al. (2015), Parolai et al. (2002) y Mihaylov et al. (2016), realizaron estudios de inversión de curvas H/V en diferentes zonas. En cada trabajo se ajustaron datos de pozo con frecuencias fundamentales de curvas H/V mediante la relación potencial (Eq 2.2), obteniendo los parámetros  $a$  y  $b$  adecuados. En un estudio realizado por Gosar y Lenart (2010) en Eslovenia, se compararon ocho relaciones potenciales obtenidas en diferentes países. Se observó una similitud entre los diferentes valores de  $b$ , mientras que el parámetro  $a$  mostraba tener una fuerte dependencia con la zona de estudio. Observaron también que el rango de profundidades estudiadas no afecta considerablemente a los valores de los parámetros.

# Capítulo 3

## Datos y Metodología

### 3.1. Datos

La técnica HVRS permite caracterizar los efectos de sitio en la zona de observación, por lo que para este trabajo se eligieron señales de ruido sísmico de estaciones sismológicas ubicadas en la Isla Grande de Tierra del Fuego y en sus alrededores (Figura 3.1). Las estaciones MG02, DSPA, VTDF, ELCA, BETA y TRVA se encuentran en la Isla Grande de Tierra del Fuego, mientras que GO10 y PARE se localizan en zona continental y MG01 y MG03 en islas cercanas. Todas están equipadas con sismómetros de banda ancha que permiten observar un gran rango de frecuencias, fundamental para la aplicación de esta técnica (Tabla 3.1).

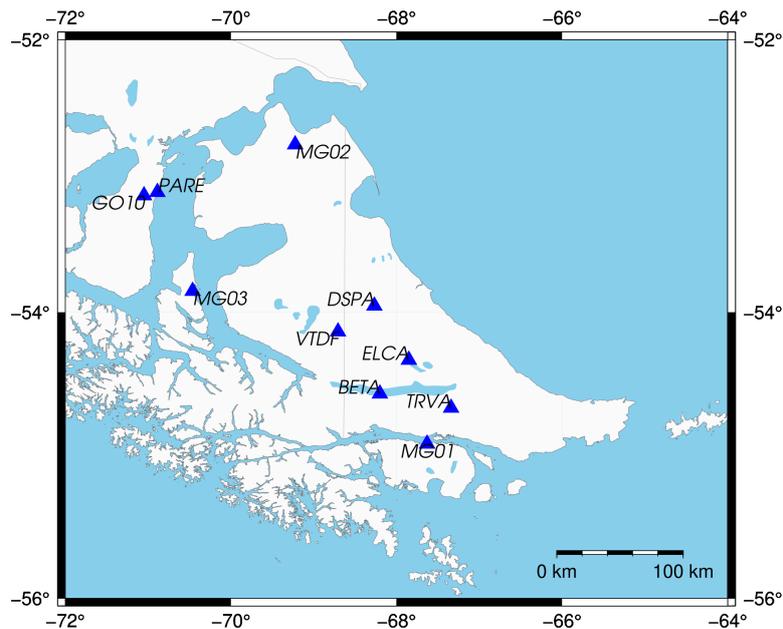


Figura 3.1: Localización de las estaciones cuyos registros fueron utilizados.

Estación	Red	Latitud [°]	Longitud [°]	Sismómetro	Datos utilizados
BETA	UNLP	-54.5833	-68.2	Güralp CMG-3T	Ago 2012 - Jul 2013
TRVA	UNLP	-54.68	-67.34	Güralp CMG-3T	Ene 2008 - Dic 2008
ELCA	UNLP	-54.34	-67.85	Güralp CMG-3T	Ene 2008 - Dic 2008
DSPA	AI	-53.953602	-68.2668	Güralp CMG-3T	Ene 2015 - Dic 2015
MG01	C1	-54.9322	-67.63	Nanometrics Trillium 120P	Ene 2016 - Dic 2016
MG02	C1	-52.7808	-69.2242	Nanometrics Trillium 120P	Ene 2019 - Dic 2019
MG03	C1	-53.84798	-70.46275	Nanometrics Trillium 120P	Mar 2018 - Feb 2019
GO10	C	-53.154598	-71.049797	Nanometrics Trillium 240	Ene 2013 - Dic 2013
PARE	YN	-53.130001	-70.888	Streckeisen STS2	Ene 2001 - Jul 2001
VTDF	XB	-54.138802	-68.7061	Streckeisen STS2	Ene 1998 - Dic 1998

Tabla 3.1: Estaciones sismológicas y período de datos analizados.

Como parte de la iniciativa de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) por ampliar la instrumentación sismológica en Tierra del Fuego, a partir de 1999 se instalaron en la zona las estaciones DSPA, TRVA, BETA y ELCA. En junio de 1999 se instaló la estación DSPA (Despedida) a partir de la colaboración entre la UNLP y el Programma Nazionale di Ricerche in Antartida (PNRA), en el marco de un proyecto para el estudio de la geofísica y geodinámica de la isla de Tierra del Fuego. La estación está ubicada en la estancia Despedida, 50 km al sudoeste de la ciudad de Río Grande, donde actualmente se encuentra en funcionamiento un sensor de banda ancha Güralp 3T. En enero de 2003 se instaló la estación TRVA, en Termas de Río Valdez, donde actualmente se encuentra en funcionamiento un Güralp 3T provisto por la UNLP. En octubre de 2006 se instaló la estación BETA, Bahía El Torito, a orillas del Lago Fagnano, que desde noviembre de 2011 se encuentra equipada con el sensor Güralp 40T. En octubre de 2007 se instaló la estación sismológica ELCA (Estancia Los Cerros) situada en la estancia Los Cerros, que estuvo equipada con un sensor Güralp 40T y funcionó hasta abril de 2011.

Por su parte, el Centro Sismológico Nacional de Chile (CSN) instaló estaciones sismológicas permanentes de banda ancha en la región de Patagonia entre 2011 y 2015 (Barrientos y Team, 2018), dentro de las cuales se encuentran las estaciones MG01 (Puer-

to Williams), MG02 (Cerro Sombrero), MG03 (Isla Dawson) de la red C1 y GO10 (Punta Arenas) de la red C.

Por último, se consideraron para este trabajo datos de dos estaciones sismológicas temporarias de las redes YN y XB, las cuales pertenecen a los proyectos SEPA I y II (Seismic Experiment in Patagonia and Antártica). La estación VTDF (Estancia Vicuña, Tierra del Fuego) de la red XB estuvo en funcionamiento desde 1997 hasta 1999, mientras que PARE (Punta Arenas) de la red YN funcionó desde 1999 hasta 2004. Estas estaciones fueron instaladas en el contexto de un estudio de banda ancha sobre la tectónica y estructura de la Península Antártica y las regiones del Mar de Scotia.

## 3.2. Cálculo de curvas H/V

Para la implementación de la técnica se utilizó el software de libre acceso *Geopsy* (GEOPhysical Signal database for noise array processing) desarrollado por el proyecto SESAME (Site Effects Assessment Using Ambient Excitations) de la Comisión Europea (European Research Project, 2004), que es un código abierto multiplataforma lanzado bajo la licencia pública GNU, reconocido como una herramienta de referencia para analizar datos de vibraciones ambientales en el contexto de estudios de caracterización de sitios. La versatilidad de *Geopsy* permite el procesamiento de todo tipo de datos necesarios en los estudios de caracterización del sitio presentando una interfaz gráfica amigable (Wathelet et al., 2020).

También se implementó *IRIS HVSR Station Toolbox* (Bahavar et al., 2020), un paquete de códigos abiertos en lenguaje Python, útil para el procesamiento de datos de estaciones pertenecientes a IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology).

Las estaciones fueron divididas en dos grupos para su procesamiento, que se basó en la disponibilidad on-line de los registros, ya que para implementar *IRIS HVSR Station Toolbox* se requiere que los datos estén disponibles en el catálogo de IRIS para poder ser descargados. De esta manera, la estaciones BETA, TRVA y ELCA, cuyos datos no están accesibles en la plataforma de IRIS, fueron elegidas para ser procesadas con *Geopsy*, y las restantes con *IRIS HVSR Station Toolbox* (Figura 3.1).

### 3.2.1. Geopsy

Para la aplicación del software *Geopsy* se utilizaron registros de ruido sísmico en cada estación, a diferentes horas del día y para diferentes días del año con el fin de tener una

muestra de la variación del ruido ambiental a lo largo del año.

Mediante la herramienta HV se realizó el procesamiento de la señal, donde se seleccionó una ventana de tiempo a analizar y luego se dividió en ventanas más pequeñas, en las cuales se calculó la relación H/V. La curva H/V final se obtuvo promediando las curvas de las ventanas individuales. El ventaneo aplicado debió respetar los criterios de confiabilidad del proyecto SESAME, descritos anteriormente.

La forma y frecuencia del pico dominante en la curva H/V, relacionadas con la estructura subyacente, fueron interpretadas siguiendo los criterios estipulados en la amplia bibliografía existente sobre el tema de caracterización de sitios. Las curvas H/V obtenidas para cada estación sísmica a diferentes horas del día y para diferentes días del año, fueron analizadas y contrastadas.

Para las estaciones BETA, TRVA y ELCA (Figura 3.1) se tomaron sismogramas a lo largo de un año a una frecuencia de muestreo de 40 Hz. Los mismos se convirtieron a formato sac mediante el software *gcf2sac* de Güralp. Luego se crearon varios códigos en lenguaje Python y se unieron los datos para obtener sismogramas por día y por mes según la componente, utilizando la librería Obspy. Las curvas H/V mensuales, se obtuvieron luego de decimar los sismogramas mensuales de 40 Hz a 20 Hz. Esto fue posible mediante códigos de Python, nuevamente con la librería Obspy.

Para el análisis del comportamiento de la curva H/V a lo largo del día, se definieron ventanas de una hora en los horarios de 5, 13 y 21 hs UTC. A modo de ejemplo la Figura 3.2 muestra la selección de una ventana de 5 a 6 am UTC del registro de la estación ELCA correspondiente al 1° de abril de 2008.

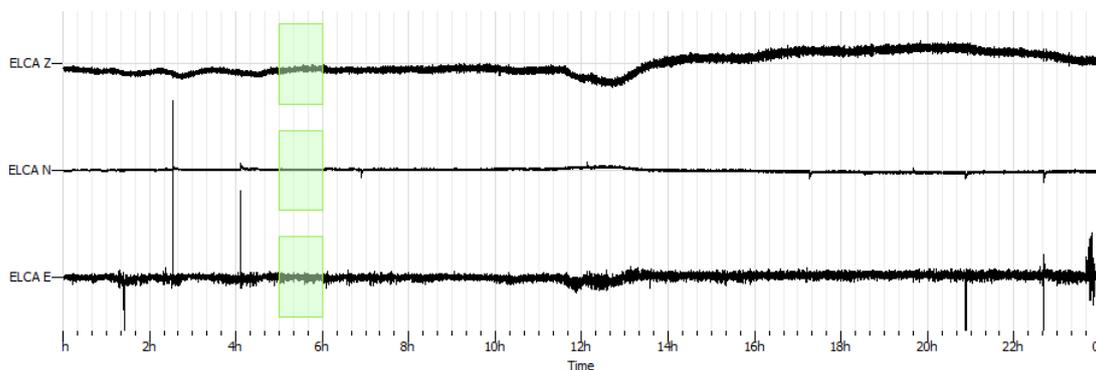


Figura 3.2: El recuadro verde indica la ventana a analizar en *Geopsy* para el cálculo de la relación H/V de los registros de la estación ELCA durante el 1° de abril de 2008.

Luego, se aplicaron los parámetros de procesamiento. Para este trabajo se eligieron ventanas temporales de 30 segundos con una superposición del 10%, un taper de tipo coseno y el suavizado recomendado por Konno y Ohmachi (1998) (Figura 3.3). Además, se realizó el promedio de las componentes horizontales mediante una media geométrica.

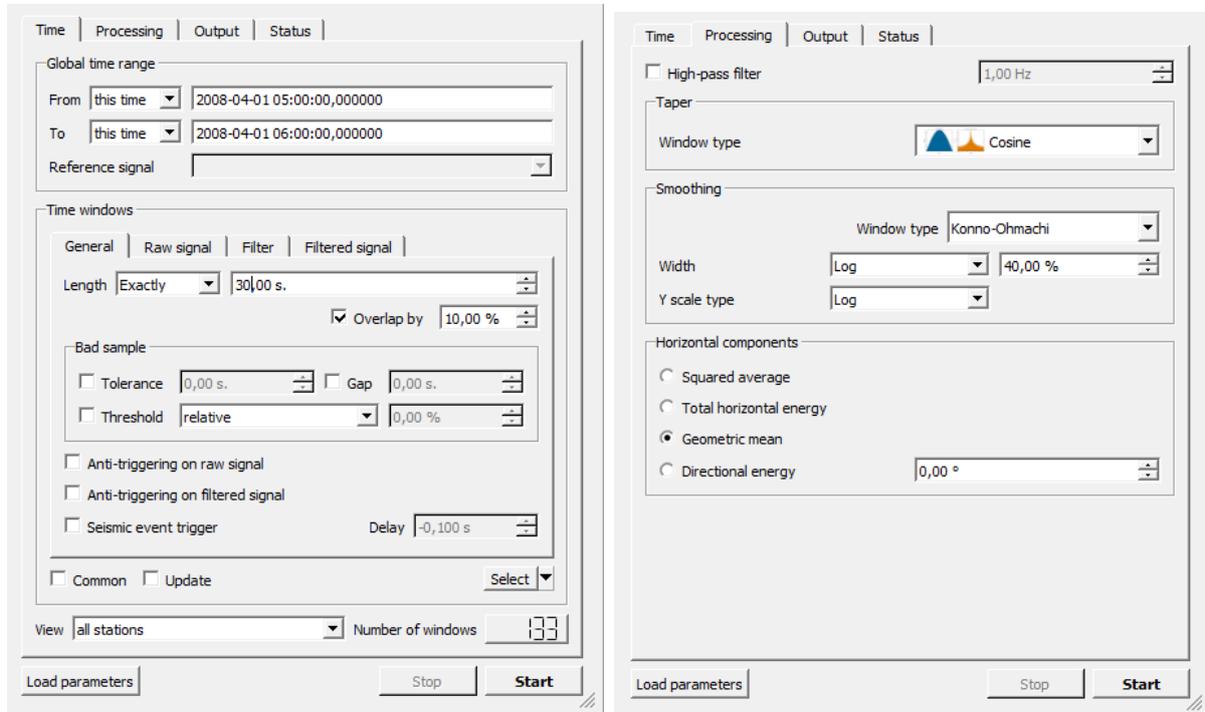


Figura 3.3: Parámetros utilizados durante el procesamiento con *Geopsy*. Se indica la ventana de tiempo analizado, longitud y superposición de ventanas, taper y suavizado aplicado.

En la Figura 3.4 se muestra el resultado del procesamiento, donde se grafica la relación H/V para cada ventana temporal y las curvas obtenidas del promedio. Los colores permiten referenciar cada curva individual con su ventana temporal correspondiente. Para la interpretación de las curvas es recomendable solo graficar las curvas H/V promediadas.

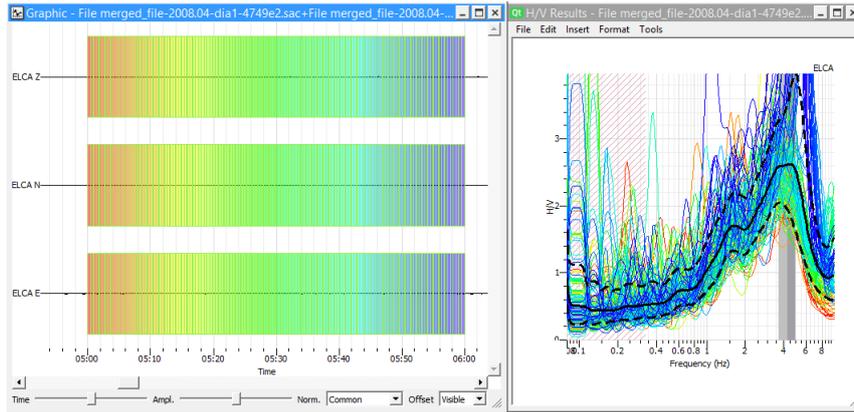


Figura 3.4: Ejemplo de curva horaria calculada para los registros  $\pm \sigma$  de la estación ELCA a las 5am UTC del 1 de abril de 2008 con el software *Geopsy*. Los colores permiten relacionar cada curva del gráfico con la ventana temporal a la que corresponde. La curva negra de trazo grueso es el resultado del promedio de todas las ventanas, mientras que las curvas negras segmentadas tienen en cuenta los datos estadísticos obtenidos. La franja gris, centrada en la frecuencia fundamental media, indica la desviación estándar de frecuencias.

Una vez obtenida la curva H/V se controla si cumple los criterios de confiabilidad, claridad y estabilidad de SESAME. Para esto se utilizó el software *HVTEST*, creado por Manuel Finessi (Finessi, 2020), donde se ingresa el resultado de la relación H/V y se controlan los nueve criterios (Figura 3.5). Esta es una herramienta muy útil ya que permite realizar un control rápido y sencillo de los parámetros de procesamiento y de los resultados.

PASS >>

PASS >>

PASS >>

PASS >>

FAIL >>

FAIL >>

PASS >>

**Criteria for a reliable H/V curve**

i)  $f_0 > 10 / l_w$   
and

ii)  $n_c(f_0) > 200$   
and

iii)  $\sigma_A(f) < 2$  for  $0.5f_0 < f < 2f_0$  if  $f_0 > 0.5\text{Hz}$   
or  $\sigma_A(f) < 3$  for  $0.5f_0 < f < 2f_0$  if  $f_0 < 0.5\text{Hz}$

**Criteria for a clear H/V peak (at least 5 out of 6 criteria fulfilled)**

i)  $\exists f^* \in [f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f^*) < A_0/2$

ii)  $\exists f^* \in [f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f^*) < A_0/2$

iii)  $A_0 > 2$

iv)  $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$

v)  $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$

vi)  $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

- $l_w$  = window length
- $n_w$  = number of windows selected for the average H/V curve
- $n_c = n_w \cdot n_{sc}$ ,  $n_{sc}$  = number of significant cycles
- $f$  = current frequency
- $f_{\text{SENSOR}}$  = sensor cut-off frequency
- $f_0$  = H/V peak frequency
- $\sigma_f$  = standard deviation of H/V peak frequency ( $f_0 \pm \sigma_f$ )
- $\varepsilon(f_0)$  = threshold value for the stability condition  $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
- $A_0$  = H/V peak amplitude at frequency  $f_0$
- $A_{HV}(f)$  = H/V curve amplitude at frequency  $f$
- $f^*$  = frequency between  $f_0/4$  and  $f_0$  for which  $A_{HV}(f^*) < A_0/2$
- $f^*$  = frequency between  $f_0$  and  $4f_0$  for which  $A_{HV}(f^*) < A_0/2$
- $\sigma_A(f)$  = "standard deviation" of  $A_{HV}(f)$ ,  $\sigma_A(f)$  is the factor by which the mean  $A_{HV}(f)$  curve should be multiplied or divided
- $\sigma_{\log HV}(f)$  = standard deviation of the  $\log A_{HV}(f)$  curve,  $\sigma_{\log HV}(f)$  is an absolute value which should be added to or subtracted from the mean  $\log A_{HV}(f)$  curve
- $\theta(f_0)$  = threshold value for the stability condition  $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$
- $V_{s,AV}$  = average S-wave velocity of the total deposits
- $V_{s,SUR}$  = S-wave velocity of the surface layer
- $h$  = depth to bedrock
- $h_{\text{min}}$  = lower-bound estimate of  $h$

**Threshold Values for  $\sigma_f$  and  $\sigma_A(f_0)$**

Frequency range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 $f_0$	0.20 $f_0$	0.15 $f_0$	0.10 $f_0$	0.05 $f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log HV}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Figura 3.5: Ejemplo de control con HVTEST para la curva H/V de los registros del 1 de abril de 2008 de la estación ELCA. En este caso cumple todos los criterios de confiabilidad y cuatro de los seis criterios de claridad.

### 3.2.2. IRIS HVSR Station Toolbox

El *IRIS HVSR Station Toolbox* del Data Management Center's (DMC's) perteneciente a IRIS es un conjunto de programas escritos en lenguaje Python que permite realizar análisis HVSR para registros de estaciones sísmicas disponibles en el DMC de IRIS con requisitos computacionales mínimos. Para el cálculo de la relación H/V los códigos utilizan los espectros de densidad de potencia (PSDs) precalculados con la herramienta MUSTANG, también de IRIS, en lugar de los espectros de amplitud de las señales. De esta manera se evitan cálculos costosos para determinar los espectros (Bahavar et al., 2020).

El principal inconveniente de usar PSDs de MUSTANG es que estos se calculan utilizando un algoritmo que implica suavizado y promediado, lo que en algunos casos puede derivar en el suavizado de algunos picos u ocultar otros detalles que se podrían observar mediante el cálculo tradicional.

Como se aclaró anteriormente, el programa de basa en mediciones de PSD horarias. La curva H/V final se obtiene convirtiendo las PSDs horarias en potencias espectrales diarias medias. El código tiene incorporado seis métodos para el cálculo de la relación. El primer método (M1) se basa en el enfoque de la DFA (Diffuse Field Assumption), donde se asume la existencia de un campo difuso, mientras que el resto de los métodos proponen diferentes formas de promediar los espectros para el cálculo del espectro horizontal (media aritmética (M2), media geométrica (M3), suma vectorial (M4), media cuadrática (M5) y análisis de máximo valor(M6)) basándose en la idea de que las ondas de mayor amplitud dominan el movimiento del suelo en un sitio y que la mayor parte de su energía se registra en las componentes horizontales. Finalmente, calcula la relación H/V diaria dividiendo los valores espectrales horizontales medios con respecto a los verticales. La curva se obtiene promediando las relaciones diarias durante el período especificado.

Para el cálculo de la relación H/V, el código requiere que el usuario ingrese los datos de la estación, el período temporal en el cual se quiere calcular la curva y otros parámetros que definirán el tipo de cálculo y curva a realizar (método de cálculo del promedio de espectros horizontales y parámetros del gráfico). A modo de ejemplo se muestra una línea ejecutada en terminal, donde se calcula la relación H/V para la estación PARE (red YN) tomando datos de banda ancha y utilizando para el cálculo la media geométrica (método 3).

```
python computeHVSR.py net=YN sta=PARE loc=02 chan='BHZ,BHN,BHE' plot=1
plotpsd=0 plotpdf=0 ymax=9 xtype=frequency n=1 removeoutliers=0
method=3 start=2019-04-01 end=2019-05-01
```

La salida será un gráfico de la curva H/V (Figura 3.6) en frecuencia y con una escala de amplitud con máxima de 9.

YN.PARE.02.BHZ-BHN-BHE YN.PARE.02.BHZ-BHN-BHE from 2001-04-01 to 2001-05-01  
using geometric mean

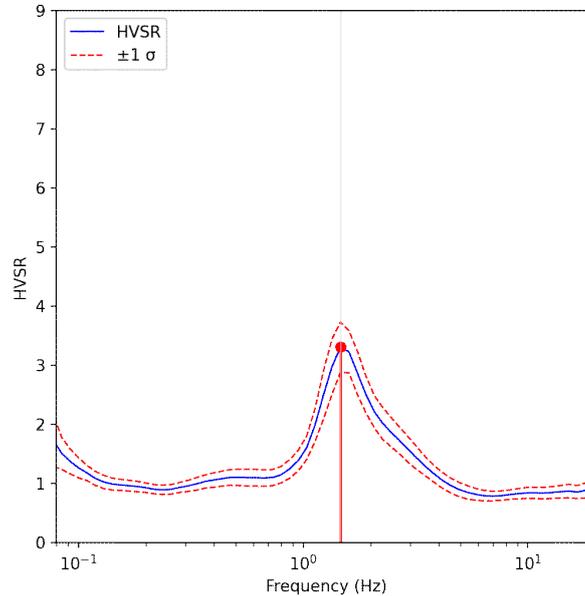


Figura 3.6: Ejemplo de curva H/V calculada de los registros de la estación PARE durante el mes de abril de 2001 utilizando *IRIS HVSR Station Toolbox*. En el título se especifica que se implementó la media geométrica para el cálculo. Con trazo azul se marca la curva promedio H/V y con trazo segmentado rojo se muestran las curvas que consideran la desviación estándar. El código automáticamente identifica el máximo y lo indica en el gráfico.

Por otro lado, el software proporciona dos herramientas que resultan beneficiosas para el uso de la técnica HVSR. La primera involucra la inspección de valores atípicos de PSDs (*removeoutlier = True*). Si se selecciona, el programa examina las PSDs horarias y elimina los valores atípicos de la línea base de ruido de la estación. La segunda herramienta proporciona una clasificación de los picos para una determinación más rápida de la frecuencia fundamental. Esta función incluye la detección automática de máximos locales en las curvas, los cuales clasifica según los seis criterios de claridad y estabilidad de amplitud propuestos por SESAME (Marcellini, 2006). En base a estas pruebas asigna una calificación de 0 a 6 (siendo 6 la más alta) a los picos (ver ejemplo de clasificación en Figura 3.7).

```

Peaks:
Parameters and ranking (A0: peak amplitude, f0: peak frequency,  $\Xi$ : satisfied)):

- amplitude clarity conditions:
  . there exist one frequency f-, lying between f0/4 and f0, such that A0 / A(f-) > 2
  . there exist one frequency f+, lying between f0 and 4*f0, such that A0 / A(f+) > 2
  . A0 > 2

- amplitude stability conditions:
  . peak appear within +/-5% on HVSR curves of mean +/- one standard deviation (f0+/f0-)
  . of lower than a frequency dependent threshold  $\epsilon(f)$ 
  .  $\sigma A$  lower than a frequency dependent threshold  $\log \theta(f)$ 

=====
±5% of f0 &          Net.Sta.Loc.Chan    f0          A0 > 2          f-          f+          f0- within
                    f0+ within ±5% of f0    of <  $\epsilon$  * f0     $\sigma \log$  HVSR <  $\log \theta$     Score/Max.
=====
YN.PARE.02.BHZ-BHN-BHE 2001-04-01 2001-05-01    1.467          3.31 > 2.0  $\Xi$     1.037  $\Xi$     2.934  $\Xi$     1.467 within
±5% of 1.467 &          1.467 within ±5% of 1.467  $\Xi$     0.0016 < 0.10 * 1.467  $\Xi$     0.2796 < 0.25    5/6

```

Figura 3.7: Ejemplo de salida para el cálculo de la relación H/V de los registros en la estación PARE durante el mes de abril de 2001 usando *IRIS HVSR Station Toolbox*. Luego del cálculo de la curva, se revisan los criterios de claridad según Marcellini (2006) y se le asigna un puntaje, en este caso 5/6.

### 3.3. Inversión

La resolución del problema inverso implica hallar un modelo de subsuelo cuya respuesta teórica sea lo más parecida posible a la observada. En este caso, el problema inverso implica encontrar un modelo de capas horizontales, definidas por sus densidades y velocidades de ondas de cuerpo, tales que el efecto de sitio generado por el paso de ondas sísmicas sea el mismo que el observado en las curvas H/V empíricas. Lograr invertir una curva H/V permite afirmar que la estructura subterránea a la estación puede ser modelada de manera simple.

Para resolver el problema directo se utilizó la plataforma *Dinver* perteneciente a *Geopsy*, el cual utiliza el *Neighborhood Algorithm* (algoritmo del vecino cercano) para la generación de modelos. Su implementación requiere ingresar un modelo inicial declarando una serie de parámetros para cada capa (densidad, relación de Poisson y velocidad de ondas P y S). El programa toma el espacio multidimensional de parámetros y genera una serie de modelos preliminares, los cuales ajusta buscando minimizar el error entre la relación H/V teórica de cada modelo y la observada. Cabe aclarar que la diferencia entre las curvas de elipticidad de los modelos evaluados y la observada puede deberse a los parámetros considerados, lo cuales deben cumplir con las leyes físicas correspondientes.

Comentar la posibilidad de que las curvas de elipticidad de los modelos no sean mas parecidas a la observada producto del sentido físico que deben mantener los parametros

para cumplir con leyes físicas.

Al ingresar la curva H/V que se desea invertir, el software convierte los datos a una curva de elipticidad, la cual utiliza para realizar la inversión. Luego, tomando el modelo inicial provisto, evalúa una gran cantidad de modelos y sus errores. El usuario es capaz de ingresar y modificar tantos modelos iniciales como desee.

Al utilizar curvas de elipticidad de Rayleigh para la inversión se asume que en el ruido sísmico se encuentra dominado por ondas superficiales y que la forma de la curva H/V depende mayoritariamente de la elipticidad de las ondas Rayleigh. Este método se basa en que la elipticidad observada está controlada principalmente por la estructura cortical debajo de la estación sísmica y que no depende de la trayectoria de las ondas Rayleigh.

Como salida se obtiene la comparación de curvas de elipticidad, donde las curvas de colores muestran cómo ajusta cada modelo generado a la curva negra de trazo grueso, equivalente a la curva H/V ingresada. La escala de colores del azul al rojo indica el error de cada modelo respecto del ingresado, siendo las curvas rojas aquellas con menor error. También se obtienen gráficos de la variación de la velocidad de las ondas P y S con la profundidad para cada modelo evaluado (Figura 3.8).

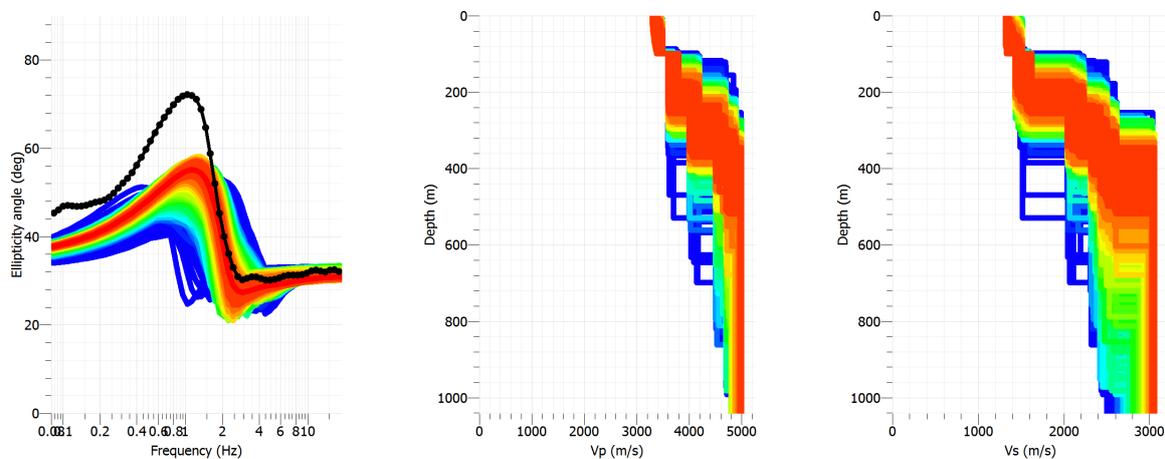


Figura 3.8: Ejemplos de resultados de inversión de curva H/V con el software *Dinver*. La curva de elipticidad negra se obtiene a partir de la curva H/V ingresada y es la utilizada por el software para realizar el proceso de inversión. El programa evalúa diferentes modelos de subsuelo a partir de un modelo inicial, obteniendo las respuestas teóricas de relación H/V y los errores respecto de la curva H/V ingresada. Los colores indican el error del ajuste, siendo rojos los modelos con menor error y azul aquellos con mayor error.

# Capítulo 4

## Resultados y discusión

### 4.1. Análisis de curvas H/V

Los datos de las estaciones fueron procesados de la manera descrita anteriormente, obteniendo curvas H/V mensuales durante 12 meses consecutivos, con el objetivo de distinguir efectos estacionales en la relación H/V. En caso de ser necesario, se calcularon curvas diarias y horarias para analizar variaciones en períodos de tiempo más pequeños.

Todas las curvas H/V de este trabajo fueron calculadas utilizando la media geométrica como método de cálculo de la componente horizontal total. Para que los resultados de ambos softwares sean comparables, las curvas se graficaron en frecuencia y con una misma escala.

A partir del análisis de criterios de claridad se decidió si los picos de las curvas corresponden a la frecuencia fundamental del suelo.

#### 4.1.1. Estación BETA

La estación BETA (Bahía El Torito), ubicada sobre la falla Magallanes-Fagnano (Figura 3.1), fue procesada con el software *Geopsy* (Sección 3.2.1), desde agosto del 2012 hasta julio del 2013. El mes de abril no fue analizado debido a la falta de datos. Las curvas correspondientes a los meses de noviembre, enero y febrero presentan un aspecto diferente al resto debido a que durante su procesamiento fue necesario aplicar *antitriggering* (se seleccionan solo las ventanas donde la amplitud de la señal es casi estacionaria) para poder obtener curvas visibles (Figura 4.1).

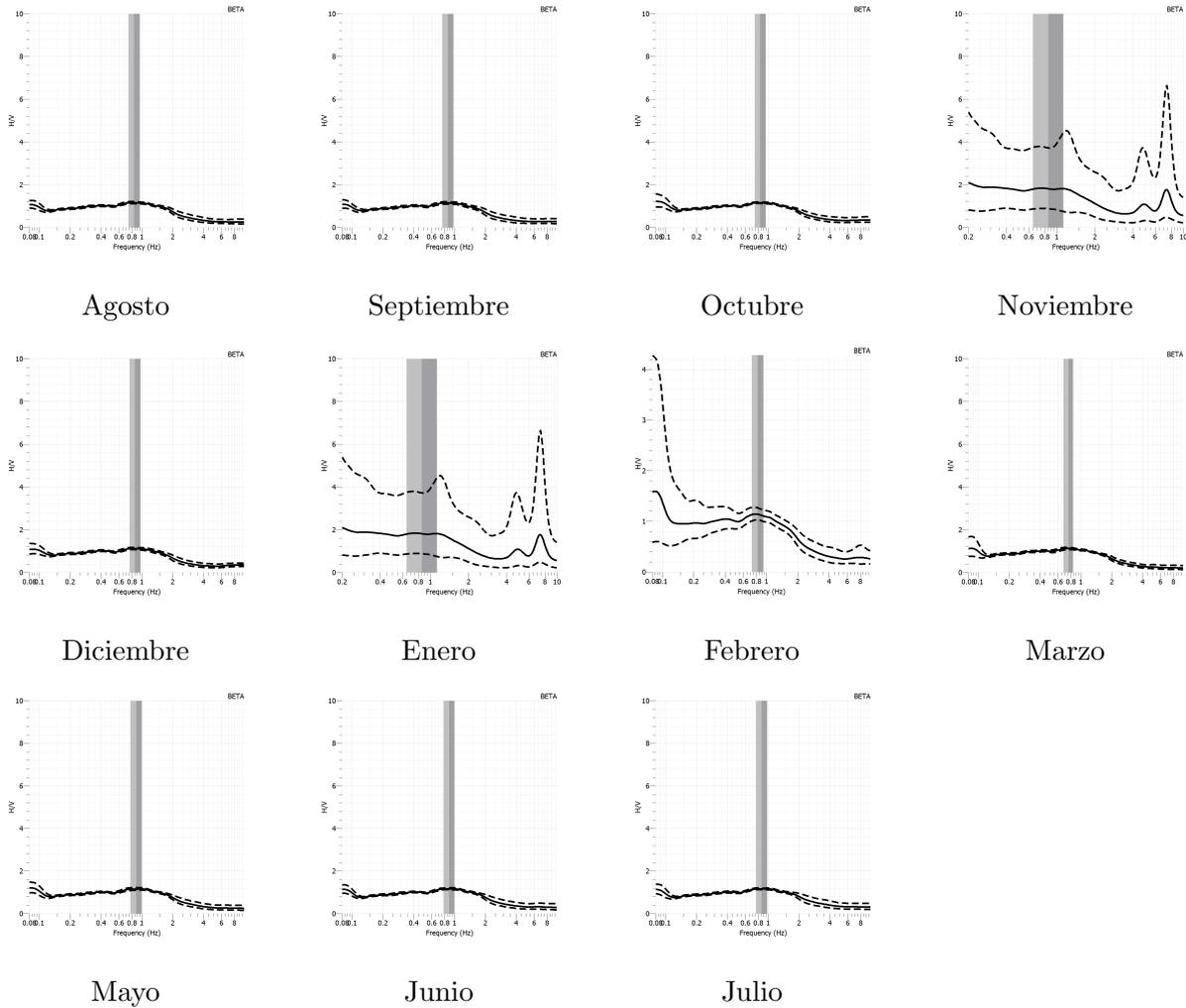


Figura 4.1: Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación BETA desde agosto 2012 hasta julio 2013. No hay pico considerable. Este comportamiento no muestra variaciones estacionales.

No se observa un máximo significativo en las curvas, ya que la pequeña zona de mayor amplitud cumple con dos de seis criterios de claridad, y por lo tanto no se considera un pico confiable (Figura 4.2).

Las curvas mensuales no muestran cambios significativos, por lo que no hay efectos estacionales visibles. Como ya se mencionó, cuando no se observan máximos claros es muy probable que la estructura subterránea local no presente un fuerte contraste de impedancia a ninguna profundidad.

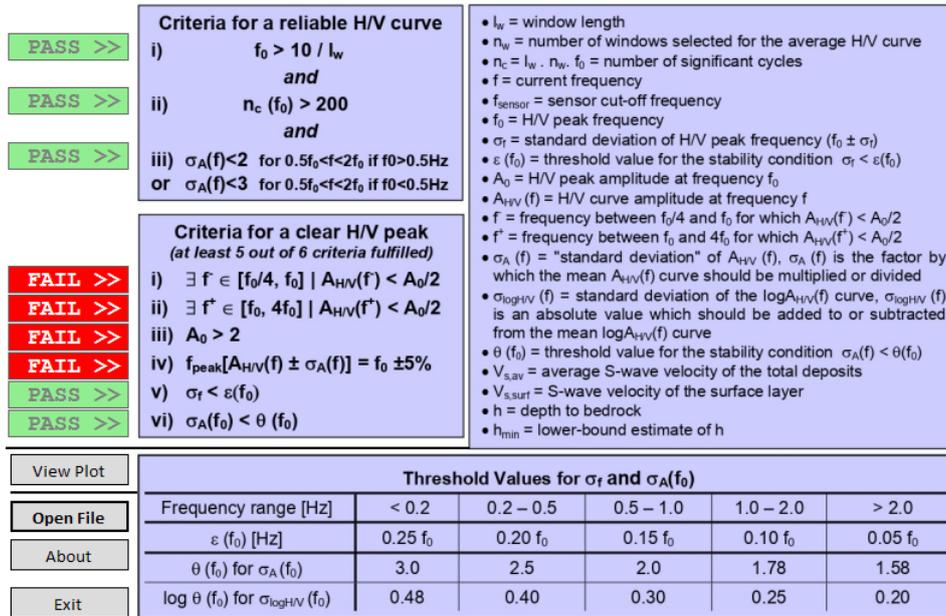


Figura 4.2: Análisis de criterios para la curva mensual de BETA en febrero de 2013. Cumple con los tres criterios de confiabilidad por lo que la curva fue procesada correctamente, pero el pico cumple solamente con dos criterios de claridad, lo que indica que no es un pico confiable.

### 4.1.2. Estación TRVA

Durante el procesamiento de los registros del 2008 de la estación TRVA (Termas del Río Valdez), con el software Geopsy, se presentaron inconvenientes con los datos de los meses de mayo hasta agosto, no pudiendo obtenerse curvas H/V aptas para interpretación.

Nuevamente, los resultados mensuales muestran curvas H/V planas (Figura 4.3), lo cual sería lo esperado ya que la estación TRVA es cercana a la estación BETA y ambas se encuentran en los alrededores de la falla Magallanes-Fagnano.

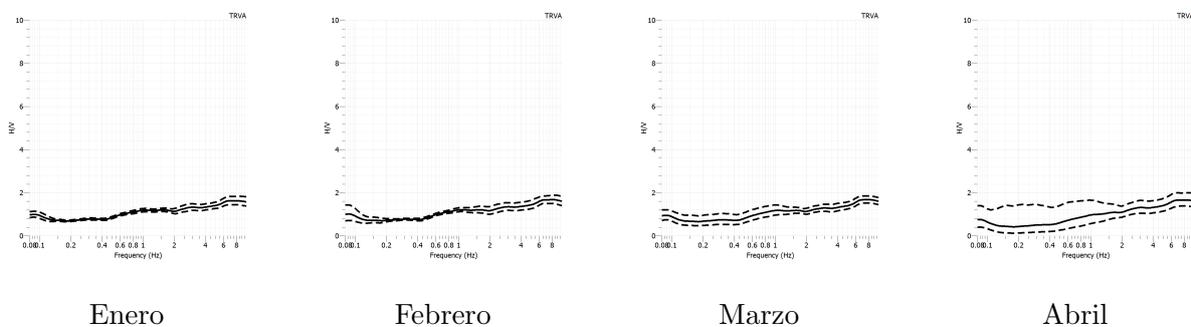


Figura 4.3: Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación TRVA durante el 2012. No hay pico considerable y no muestra variaciones estacionales.

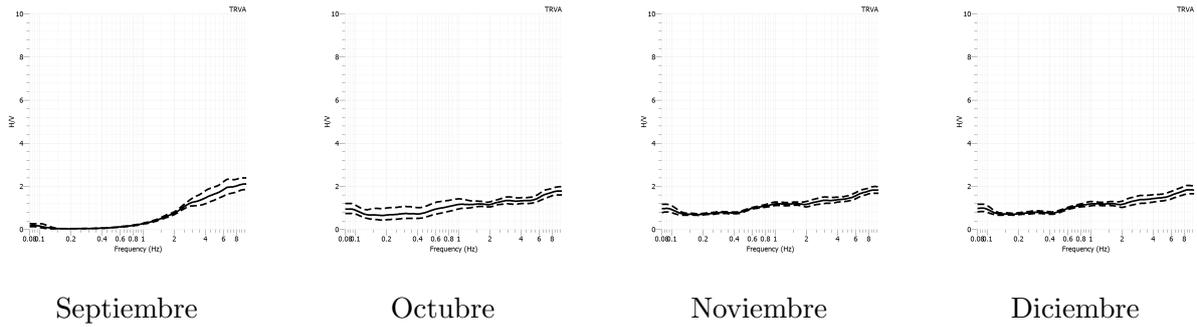


Figura 4.3: (continuación) Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación TRVA durante el 2012. No hay pico considerable y no muestra variaciones estacionales.

### 4.1.3. Estación ELCA

Un caso particular es el de la estación ELCA, ubicada dentro de la Cuenca Austral (Figura 3.1). Realizando el mismo procesamiento que las estaciones anteriores con el software Geopsy, los resultados mensuales muestran un pico de amplitud variable a lo largo del año (Figura 4.4), que podría interpretarse inicialmente como una variación causada por cambios de temperatura estacional.

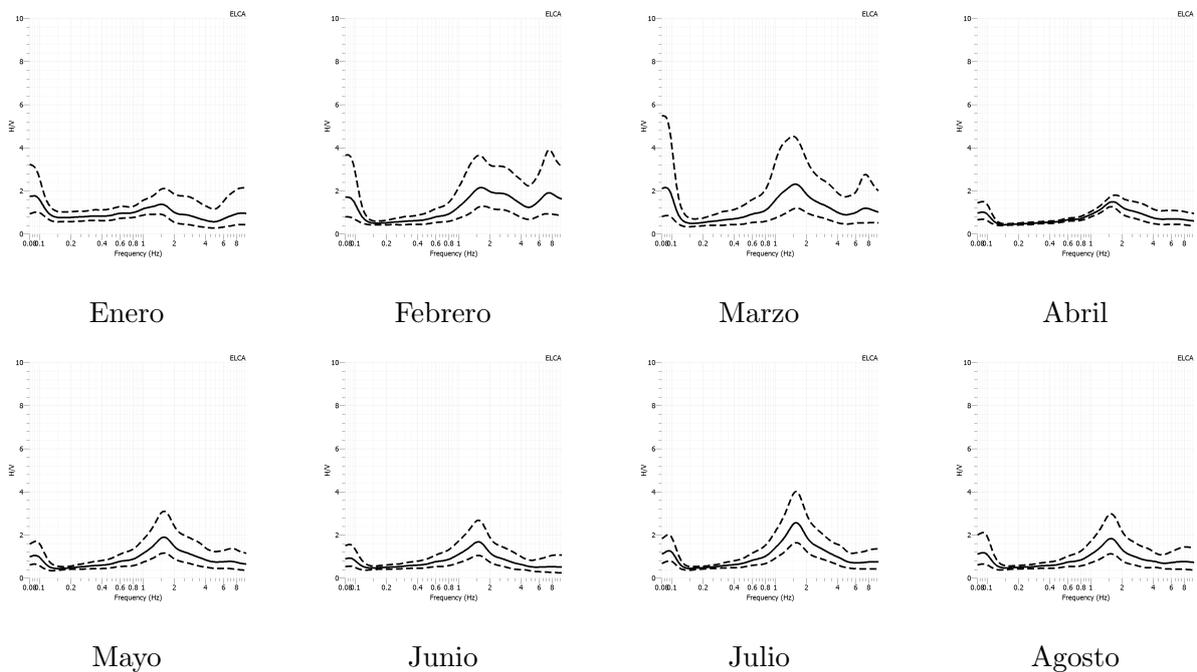


Figura 4.4: Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación ELCA durante el 2012. Las curvas muestran un pico permanente a lo largo del año de origen industrial.

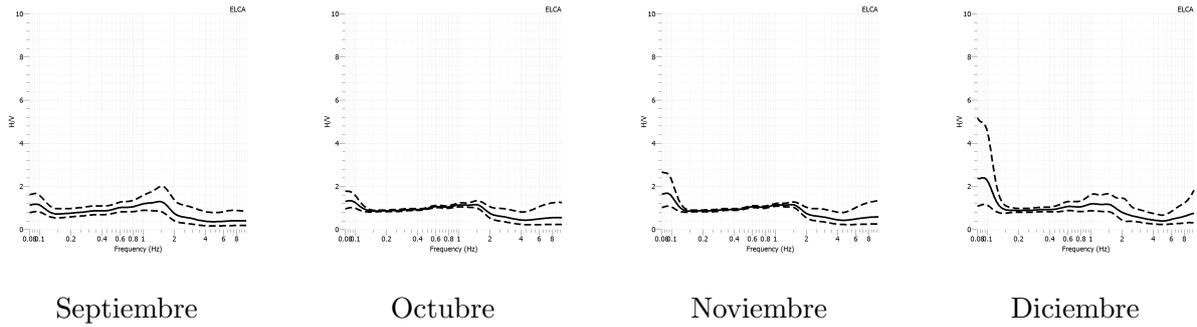


Figura 4.4: (continuación) Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación ELCA durante el 2008. Las curvas muestran un pico permanente a lo largo del año de origen industrial.

Teniendo en cuenta que la estación ELCA se encuentra dentro de una estancia, de ahí su nombre Estancia Los Cerros, su ubicación es un factor importante al momento de interpretar los resultados ya que un análisis más exhaustivo de las curvas mostró una variación diaria significativa.

Se calcularon tres nuevas curvas de una hora para un mismo día, 20 de mayo, a las 5, 13 y 21 hs UTC (Figura 4.5), 2, 10 y 18 hs en Hora Local. Se puede apreciar el cambio de la amplitud del pico a lo largo del día que parece aumentar durante las horas laborales. A continuación se tomaron los datos para un día no laborable, en este caso el 20 de junio, día de la bandera para la República Argentina, y no se observó la variación antes vista, si no que la curva se mantuvo relativamente plana.

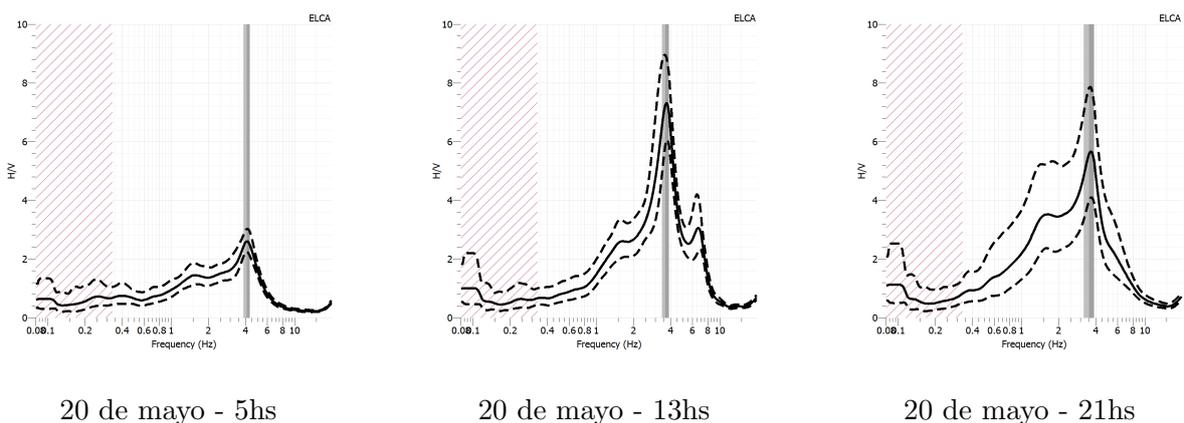


Figura 4.5: Variación de la curva H/V para registros de la estación ELCA, durante un día laboral (20 de mayo) y un día feriado (20 de junio). La comparación muestra como las amplitudes aumentan durante horas de trabajo y se mantienen bajas en días de descanso. Este comportamiento es un indicio de que se trata de un pico de origen industrial.

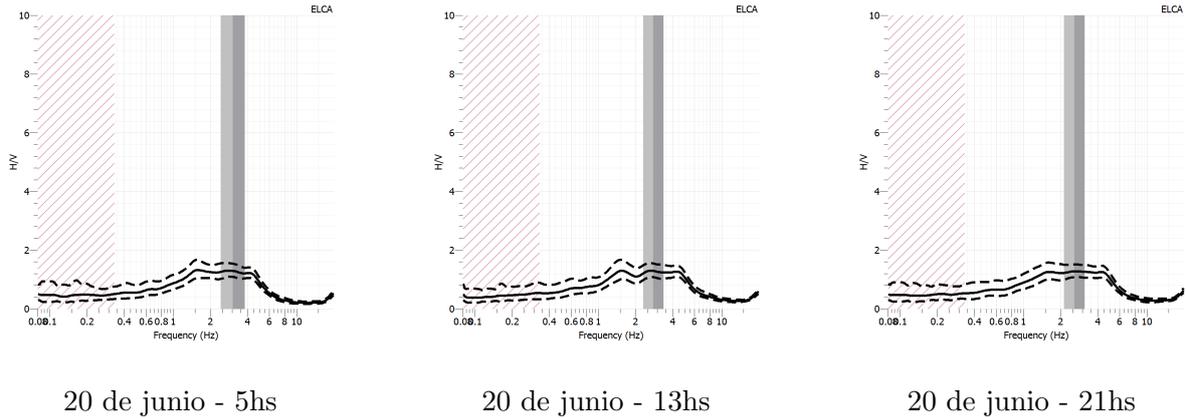


Figura 4.5: (continuación) Variación de la curva H/V para registros de la estación ELCA, durante un día laboral (20 de mayo) y un día feriado (20 de junio). La comparación muestra como las amplitudes aumentan durante horas de trabajo y se mantienen bajas en días de descanso. Este comportamiento es un indicio de que se trata de un pico de origen industrial.

El análisis se repitió en varios momentos del año, considerando días laborales y no laborales, observando tendencias similares. Este comportamiento es indicativo de que el pico podría ser de origen industrial y que no refleje verdaderamente la frecuencia fundamental del suelo. Para corroborarlo se calculó el espectro de amplitud de la señal para comparar ambos días, ya que en caso de existir una señal de origen industrial, deberían verse zonas de gran amplitud en el espectro. Siguiendo las recomendaciones del SESAME (Marcellini, 2006), se tomaron seis intervalos de una hora desde las 10 hasta las 15 hs UTC (7 a 12 hs Hora Local) y se calculó su transformada de Fourier sin aplicar suavizados (Figura 4.6). Resulta claro el comportamiento anómalo del espectro para el 20 de mayo respecto del correspondiente al feriado del 20 de junio.

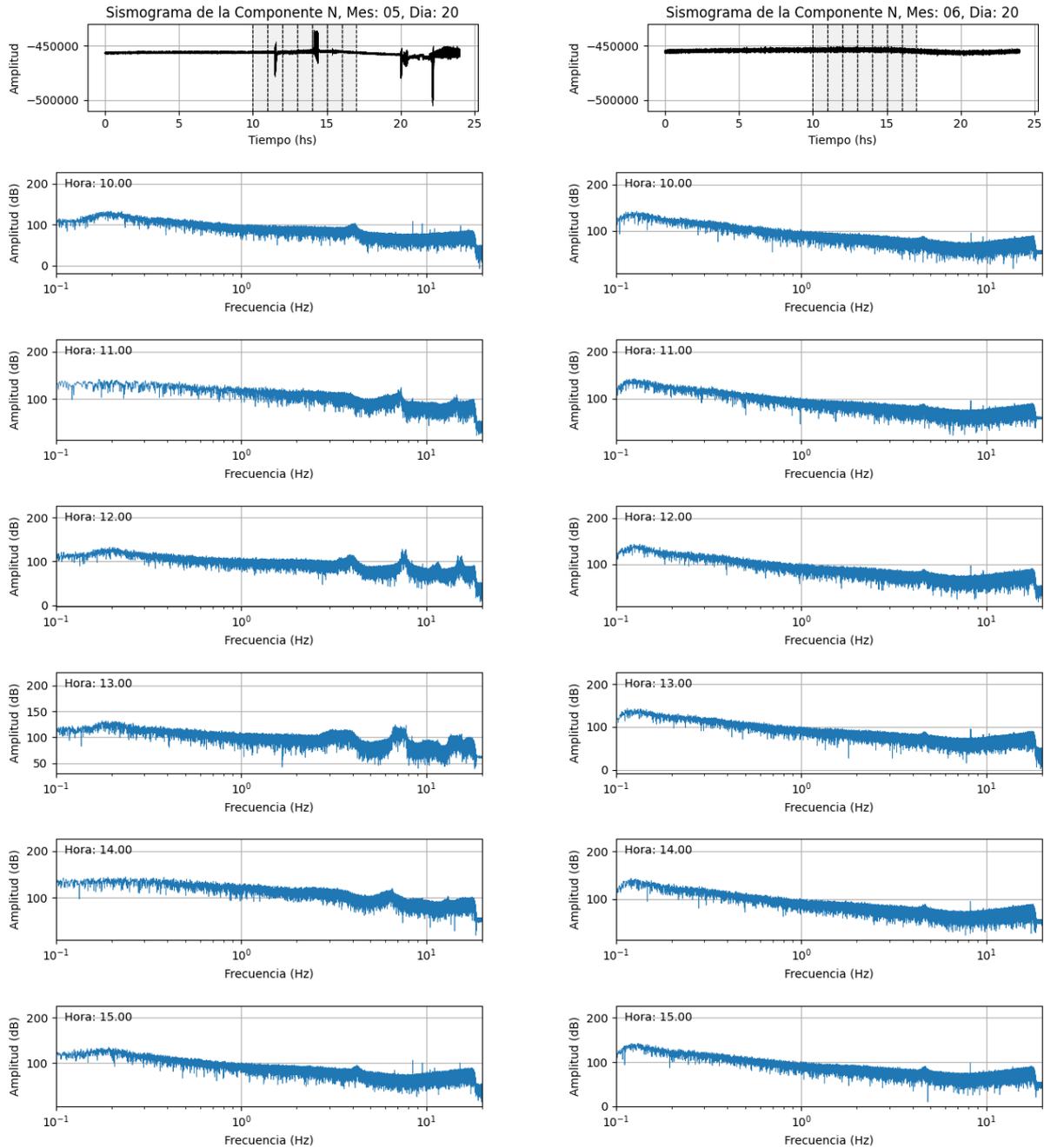


Figura 4.6: Comparación espectral de dos registros diarios (20/05 y 20/06) de la estación ELCA para verificar si se trata de un pico industrial. Se muestran los sismogramas y sus respectivos espectros de amplitud para seis horas seguidas de la componente Norte. La columna de la izquierda corresponde al 20 de mayo de 2008, día laborable, y la columna de la derecha corresponde al 20 de junio, día feriado del mismo año.

Se determina que la presencia de este pico de gran amplitud y con variación durante horas nocturnas y diurnas en las curvas H/V es de origen industrial, siendo alta la probabilidad de que una maquinaria en uso sea la responsable de generar microsismos en la

zona, especialmente en frecuencias mayores a los 2 Hz.

#### 4.1.4. Estación DSPA

La estación DSPA se encuentra en el centro de la isla, dentro de la Cuenca Austral (Figura 3.1). Fue procesada con el software *IRIS HVSR Station Toolbox* (Sección 3.2.2), tomando datos diarios y mensuales del año 2015 (Figura 4.7).

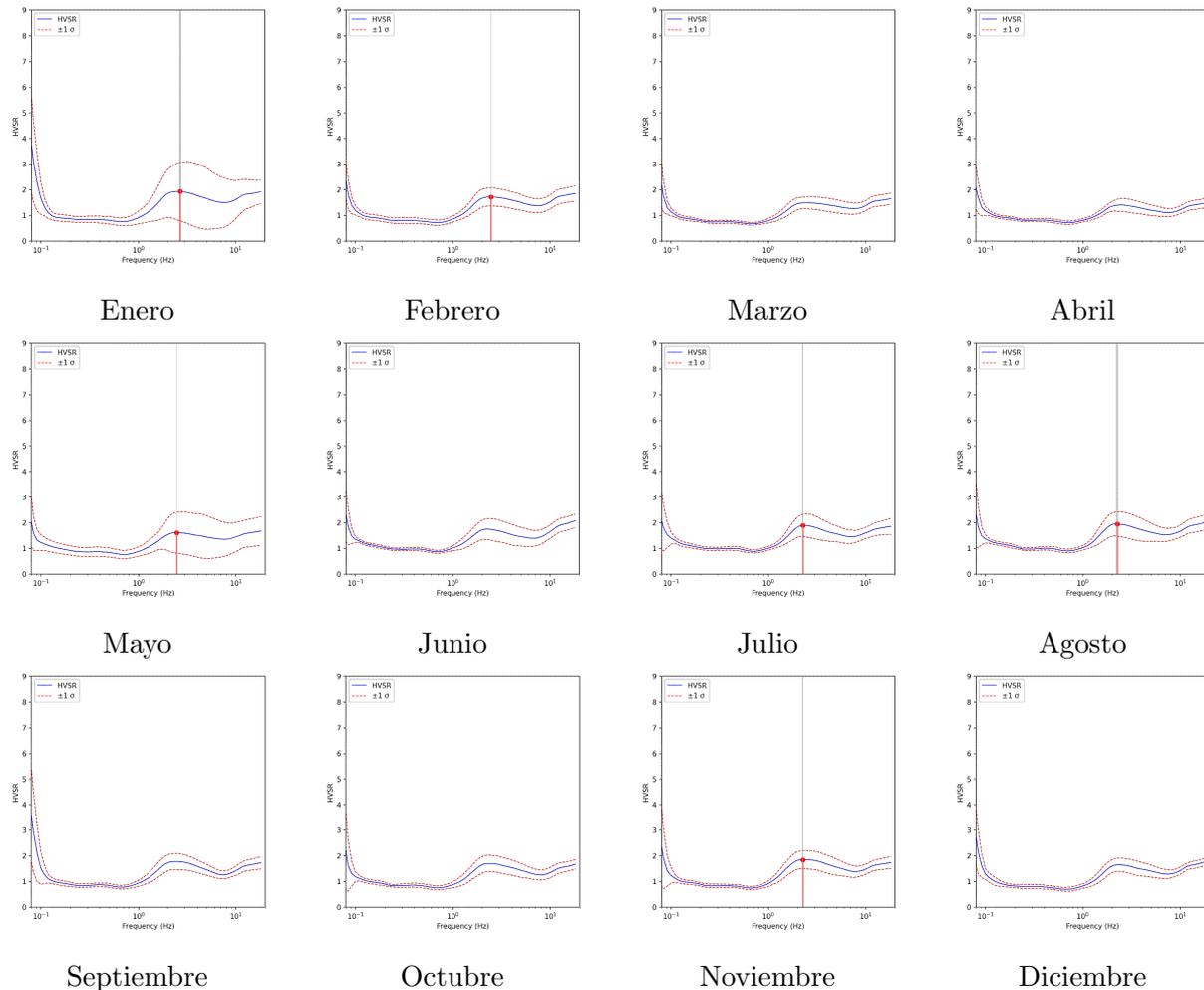


Figura 4.7: Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación DSPA durante el 2015. Las curvas presentan un pico que no cumple con suficientes criterios de claridad, sin embargo se considera que su permanencia temporal sugiere un efecto de sitio generado por un reflector somero.

A lo largo de los meses se aprecia la permanencia de un pico de frecuencia  $f_0 \approx 2.26$  Hz, que no cumple con la cantidad de criterios de claridad necesarios para ser clasificado como pico claro (Tabla 4.1).

$f_0$	$A_0 > 2$	$\exists f^-$	$\exists f^+$	$f_0^-$ dentro del $\pm 5\%$ de $f_0$ & $f_0^+$ dentro del $\pm 5\%$ de $f_0$	$\sigma_f < \epsilon *$ $f_0$	$\sigma \log HVSR < \log \theta$
2.263	$1.95 > 2.0$	0.872 ✓	-	2.263 dentro del $\pm 5\%$ de 2.263 & 2.263 dentro del $\pm 5\%$ de 2.263 ✓	0.0502 < 0.05*2.263 ✓	0.4111 < 0.20

Tabla 4.1: Tabla de criterios para el análisis del máximo de la curva H/V correspondiente a la estación DSPA para el mes de agosto del 2015, según *IRIS HVSR Station Toolbox*. Este pico cumple con menos criterios que los recomendados, por lo que no se considera un pico claro.

La estación DSPA se caracteriza por encontrarse en una zona de mucho viento, lo cual es una posible explicación para el pico poco definido.

No obstante, la permanencia anual y la estabilidad de este pico no son factores menores. Es posible que la técnica HVSR no sea lo suficientemente resolutive en este caso y que no permita distinguir la frecuencia de resonancia del suelo. Este pico podría haber sido generado por un efecto de sitio causado por un reflector horizontal somero. Se recomienda, en estos casos, realizar más pruebas y aplicar otras técnicas para corroborar estas teorías.

#### 4.1.5. Estación MG01

La estación chilena MG01 (Puerto Williams) es la más austral de las estudiadas (Figura 3.1), perteneciente a la red C1 (Red Sismológica Nacional) y fue procesada con el software *IRIS HVSR Station Toolbox* durante el año 2016. En las curvas mensuales se aprecia la existencia de un pico con frecuencia  $f_0 \approx 1.037$  Hz y amplitud  $A_0 \approx 3.1$  (Figura 4.8).

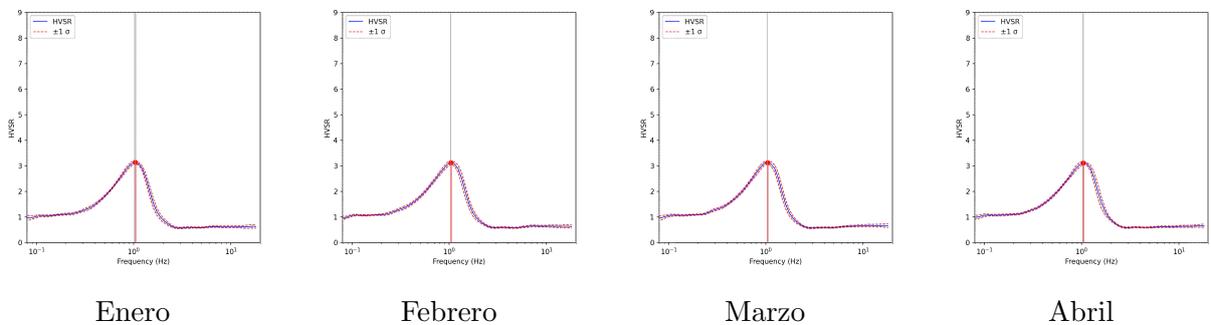


Figura 4.8: Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación MG01 durante el 2016. Existe un pico claro sin variación estacional que cumple con suficientes criterios de claridad, causado posiblemente por un reflector profundo.

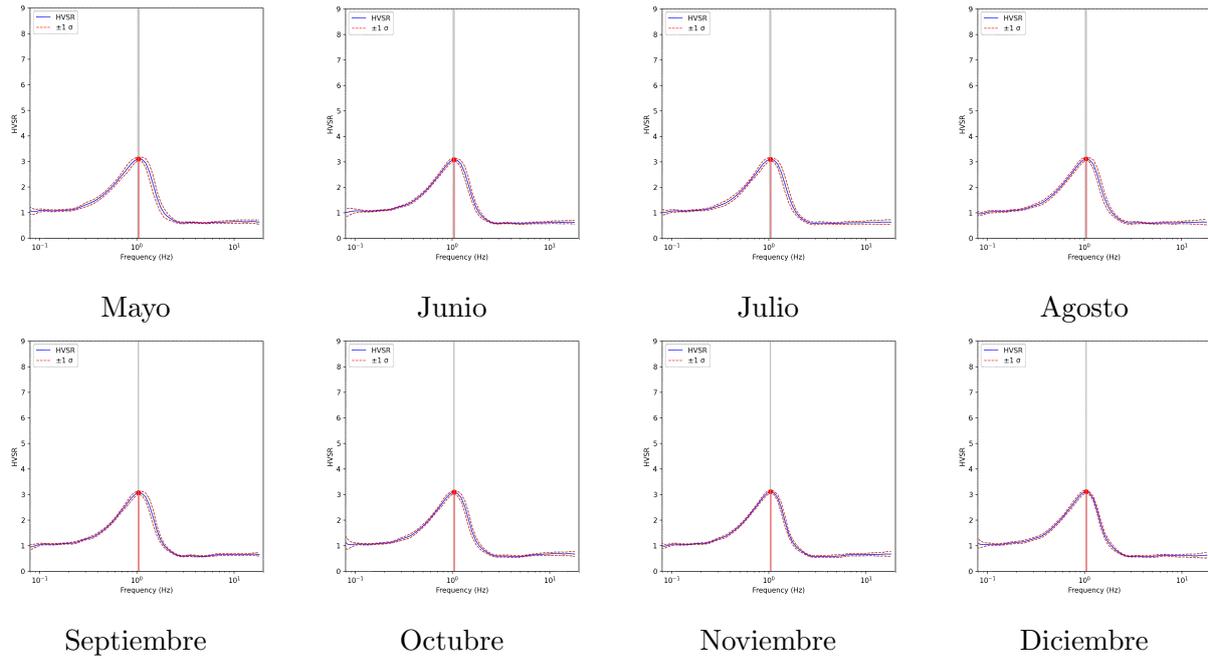


Figura 4.8: (continuación) Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación MG01 durante el 2016. Existe un pico claro sin variación estacional que cumple con suficientes criterios de claridad, causado posiblemente por un reflector profundo.

Este pico además cumple con los seis criterios de claridad para todos los meses (a modo de ejemplo se muestra el control de criterios para la curva H/V del mes de julio en la Tabla 4.2), a excepción del mes de junio donde cumple con cinco criterios. Por esta razón, se clasifica como un pico claro que puede estar asociado a contrastes de impedancia y es apto para estudios de inversión.

$f_0$	$A_0 > 2$	$\exists f^-$	$\exists f^+$	$f_0^-$ dentro del $\pm 5\%$ de $f_0$ & $f_0^+$ dentro del $\pm 5\%$ de $f_0$	$\sigma_f < \epsilon *$ $f_0$	$\sigma \log HVSR <$ $\log \theta$
1.037	$3.10 > 2.0$ ✓	0.400 ✓	1.745 ✓	1.037 dentro del $\pm 5\%$ de 1.037 & 1.037 dentro del $\pm 5\%$ de 1.037 ✓	0.0214 < 0.10 * 1.037 ✓	0.2238 < 0.25 ✓

Tabla 4.2: Tabla de criterios para el análisis del pico de la curva H/V correspondiente al mes de julio del 2016 de la estación MG01, según *IRIS HVSR Station Toolbox*. Cumple con todos los criterios de claridad por lo que el pico corresponde a la frecuencia fundamental del sitio.

### 4.1.6. Estación MG02

La estación más boreal estudiada es la chilena MG02 (Cerro Sombrero), perteneciente a la red C1 (Red Sismológica Nacional) y ubicada dentro de la Cuenca Austral (Figura 3.1). Fue procesada con el software *IRIS HVSR Station Toolbox*, tomando datos mensuales y diarios del año 2019. La comparación mensual de las curvas H/V muestra una clara permanencia temporal de un pico de frecuencia  $f_0 \approx 0.109$  Hz y amplitud  $A_0 \approx 3.9$  (Figura 4.9).

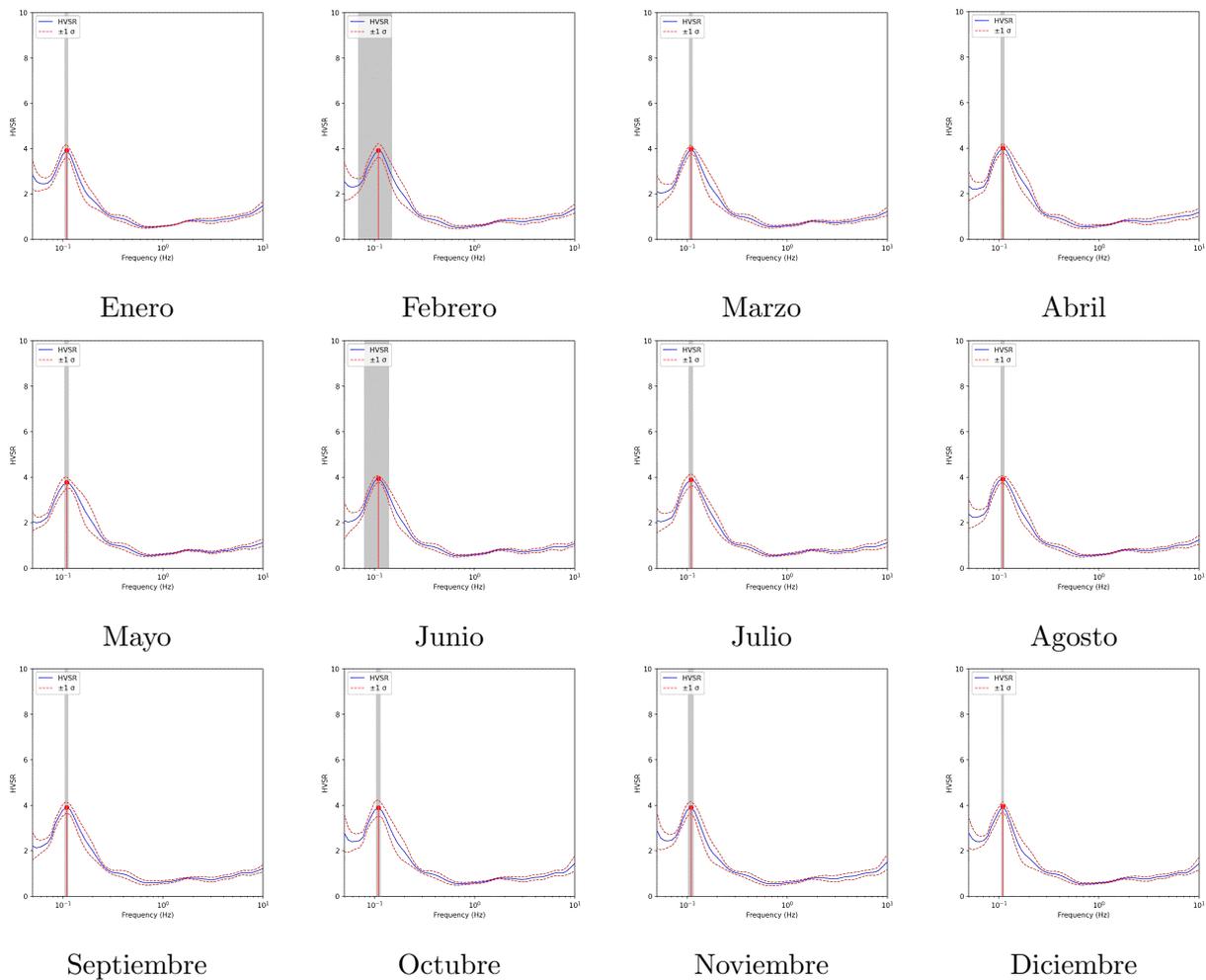


Figura 4.9: Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación MG02 durante el 2019. El pico claro y sin variaciones estacionales muestra el efecto de sitio causado por un reflector profundo.

El conteo de criterios de claridad indica que el pico cumple con cinco de seis criterios (a modo de ejemplo se muestran los criterios para el mes de abril en la Tabla 4.3), lo que demuestra que la zona no es sensible a cambios estacionales y que es apta para estudios de inversión.

$f_0$	$A_0 > 2$	$\exists f^-$	$\exists f^+$	$f_0^-$ dentro del $\pm 5\%$ de $f_0$ & $f_0^+$ dentro del $\pm 5\%$ de $f_0$	$\sigma_f < \epsilon *$ $f_0$	$\sigma \log HVSR < \log \theta$
0.109	$4.00 > 2.0$ ✓	-	0.218 ✓	0.109 dentro del $\pm 5\%$ de 0.109 & 0.109 dentro del $\pm 5\%$ de 0.109 ✓	$0.0046 < 0.25 * 0.109$ ✓	$0.2187 < 0.48$ ✓

Tabla 4.3: Tabla de criterios para el análisis del máximo en la curva H/V correspondiente a la estación MG02 para el mes de abril del 2019, según *IRIS HVSR Station Toolbox*. Cumple con cinco de seis criterios por lo que se puede decir que el pico es la frecuencia fundamental del terreno.

#### 4.1.7. Estación MG03

La estación chilena MG03 (Isla Dawson), perteneciente a la red C1 (Red Sismológica Nacional), se encuentra fuera de la Isla Grande de Tierra del Fuego, dentro del Cinturón de pliegues y deslizamientos de Magallanes (Figura 3.1). Sus datos mensuales y diarios fueron procesados con el software *IRIS HVSR Station Toolbox*, desde marzo del 2018 hasta febrero del 2019 (Figura 4.10).

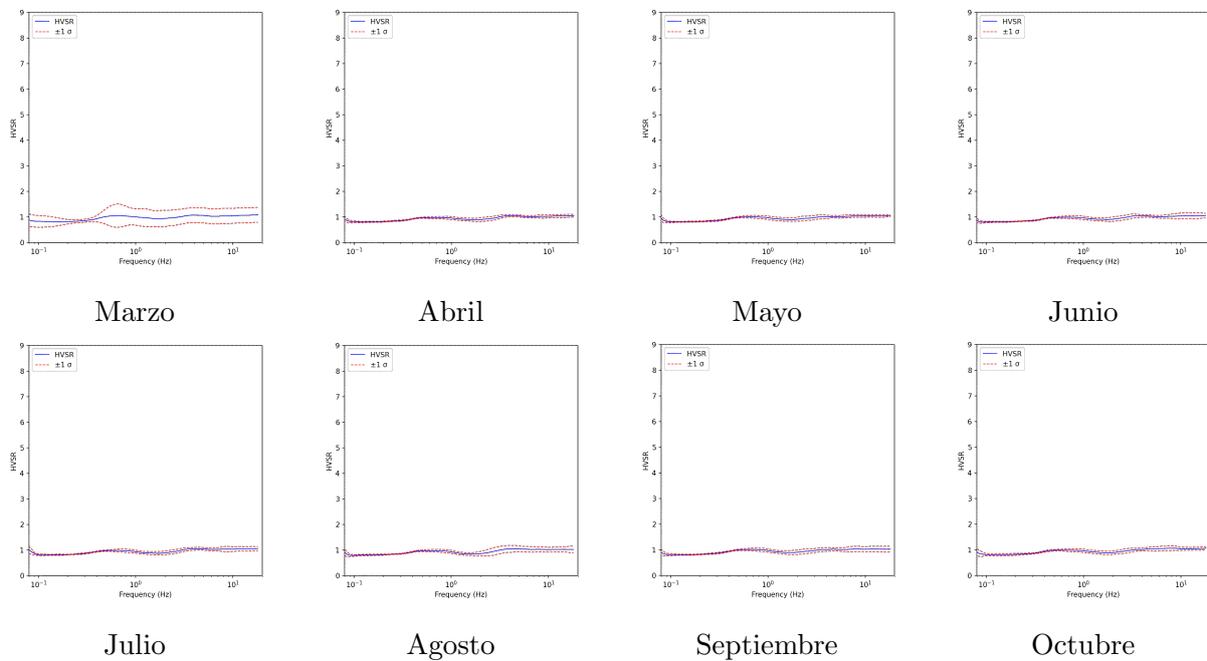


Figura 4.10: Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación MG03 desde marzo del 2018 hasta febrero del 2019. No hay pico considerable y no muestra variaciones estacionales.

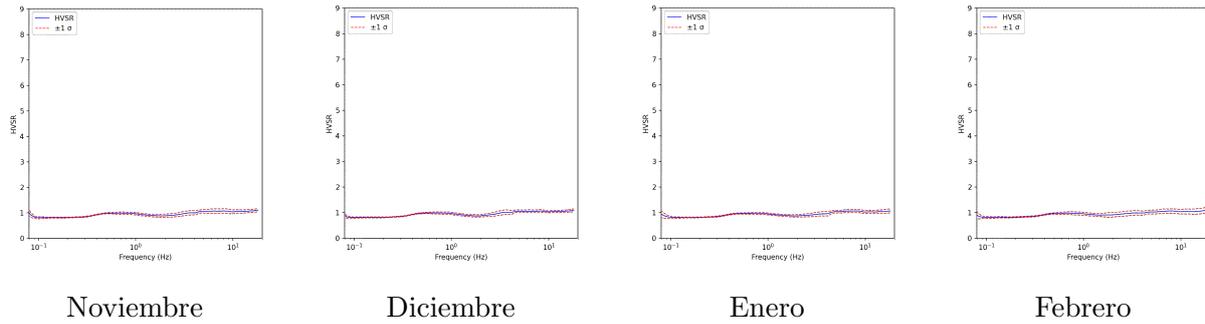


Figura 4.10: (continuación) Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación MG03 desde marzo del 2018 hasta febrero del 2019. No hay pico considerable y no muestra variaciones estacionales.

No hay presencia de pico en las curvas. Este comportamiento se mantiene a lo largo del año. Se trata entonces de una zona donde existe la posibilidad de que no hayan grandes contrastes de impedancia; aunque no se descarta una posible amplificación debida a efectos de sitio.

#### 4.1.8. Estación VTDF

La estación temporal VTDF (Estancia Vicuña, Tierra del Fuego), perteneciente a la red XB, estuvo en funcionamiento desde febrero de 1997 hasta diciembre de 1999. Se ubica en el centro de la Isla, dentro de la Cuenca Austral y es cercana a la estación ELCA (Figura 3.1).

Al momento de ser procesada, sólo se pudo obtener continuidad de datos desde enero de 1998 hasta noviembre del mismo año (Figura 4.11). Se observó que las curvas permanecen planas a lo largo del año, lo cual indica que al estar en una zona sedimentaria no existen contrastes de impedancia altos que puedan generar un pico en la curva H/V.

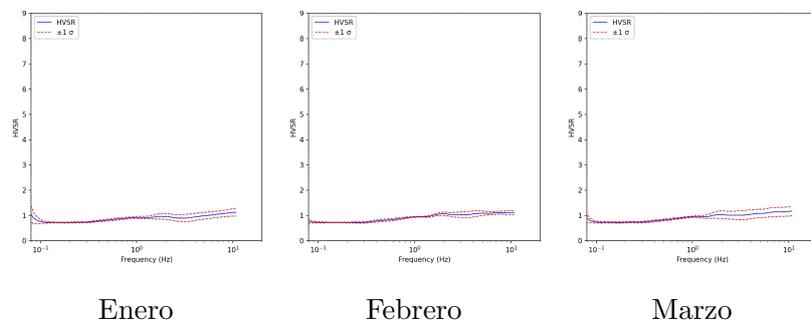


Figura 4.11: Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación VTDF durante 1998. No hay pico considerable y no muestra variaciones estacionales.

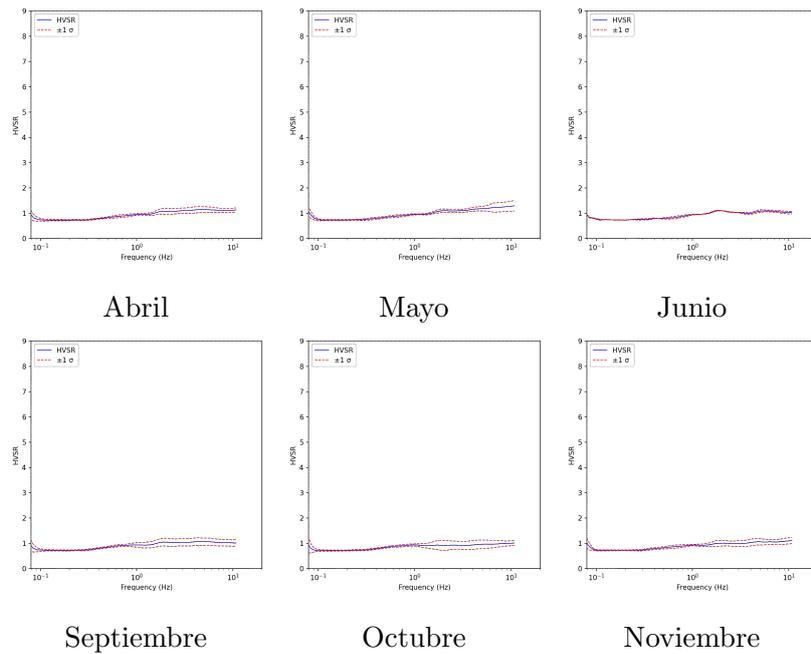


Figura 4.11: (continuación) Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación VTDF durante 1998. No hay pico considerable y no muestra variaciones estacionales.

#### 4.1.9. Estaciones GO10 y PARE

Resultan de particular interés los resultados para los datos de las estaciones cercanas GO10 y PARE, ambas ubicadas en Punta Arenas, Chile.

La estación GO10 pertenece a la red C (Chilean National Seismic Network) y funciona como una estación permanente desde julio del 2011, mientras que la estación PARE tuvo un objetivo temporario (red YN) en el 2001.

Los datos sismológicos fueron procesados con la herramienta *IRIS HVSR Station Toolbox*. Debido a la proximidad entre estaciones, 11.167 km, se esperaría que los resultados sean similares. Sin embargo, al comparar las curvas H/V es notable la diferencia entre ambas, presentando tres posibles picos de estudio para la estación GO10 mientras que para la estación PARE existe un único pico de mayor amplitud (Figura 4.12).

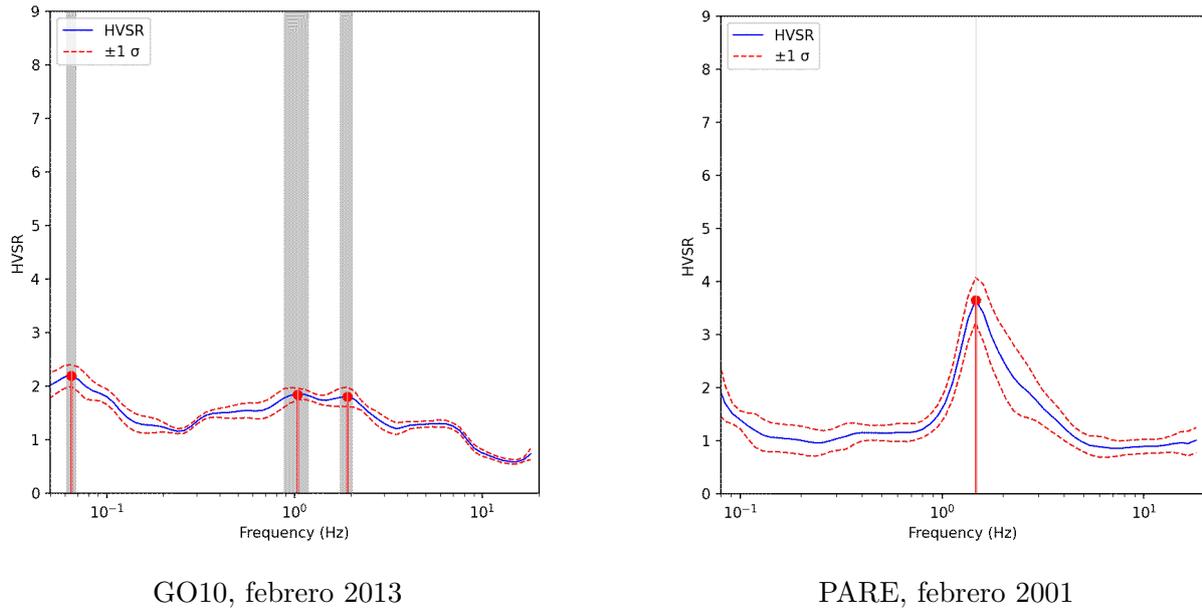


Figura 4.12: Comparación de curvas mensuales en el mes de febrero para las estaciones GO10 y PARE. A pesar de su proximidad, las curvas muestran ser claramente diferentes.

Se analizaron los picos según los criterios de claridad de SESAME. Los picos de la estación GO10 cumplen entre dos y cuatro criterios por lo que no son considerados picos claros, mientras que el pico de la estación PARE cumple cinco criterios (Tabla 4.4).

	$f_0$	$A_0 > 2$	$\exists f^-$	$\exists f^+$	$f_0^-$ dentro del $\pm 5\%$ de $f_0$ & $f_0^+$ dentro del $\pm 5\%$ de $f_0$	$\sigma_f < \epsilon^*$ $f_0$	$\sigma \log HVSR < \log \theta$
PARE	1.467	3.65 ✓	1.037 ✓	2.934 ✓	1.467 dentro del $\pm 5\%$ de 1.467 & 1.467 dentro del $\pm 5\%$ de 1.467 ✓	0.0015 < 0.10*1.467 ✓	0.2738 < 0.25
GO10	0.065	2.20 ✓	-	-	0.065 dentro del $\pm 5\%$ de 0.065 & 0.065 dentro del $\pm 5\%$ de 0.065 ✓	0.0041 < 0.25 * 0.065 ✓	0.1708 < 0.48 ✓
	1.903	1.80	-	-	1.903 dentro del $\pm 5\%$ de 1.903 & 1.903 dentro del $\pm 5\%$ de 1.903 ✓	0.1443 < 0.10 * 1.903 ✓	0.1571 < 0.25 ✓
	1.037	1.85	-	-	1.037 dentro del $\pm 5\%$ de 1.037 & 1.037 dentro del $\pm 5\%$ de 1.037 ✓	0.1541 < 0.10 * 1.037	0.1638 < 0.25 ✓

Tabla 4.4: Criterios de claridad y estabilidad correspondientes a los picos de las curvas H/V de las estaciones GO10 (febrero 2013) y PARE (febrero 2001), según *IRIS HVSR Station Toolbox*.

Estos últimos resultados son los que permiten realizar un análisis más detallado de las curvas H/V. De acuerdo a los lineamientos dados por SESAME, cuando se tiene una curva H/V con picos que abarquen un gran intervalo de frecuencias, como podría ser el caso de los dos picos pequeños de la estación GO10 que se encuentran entre 1 Hz y 2 Hz, se recomienda observar en zonas aledañas a la estación en búsqueda de picos más claros. Esto lleva a la estación cercana PARE cuyo pico, en la frecuencia  $f \approx 1.467$  Hz, se clasifica como un pico claro y se ubica en el mismo rango de frecuencias que los picos pequeños de la estación GO10. Todas estas características cumplen con lo especificado por SESAME, quienes recomiendan que en este caso se debe considerar la existencia de una posible variación lateral del subsuelo.

También, se analizó el pico de frecuencia baja para la estación GO10 (Figura 4.13). Según los lineamientos, los picos de baja frecuencia pueden tener diversos orígenes, por lo que se plantean controles para verificar si el pico es de origen geológico. Se recomienda revisar el funcionamiento del sensor y el estado meteorológico durante las mediciones. Estos fueron verificados, siendo GO10 una estación con buen funcionamiento y las curvas H/V sin grandes variaciones estacionales.

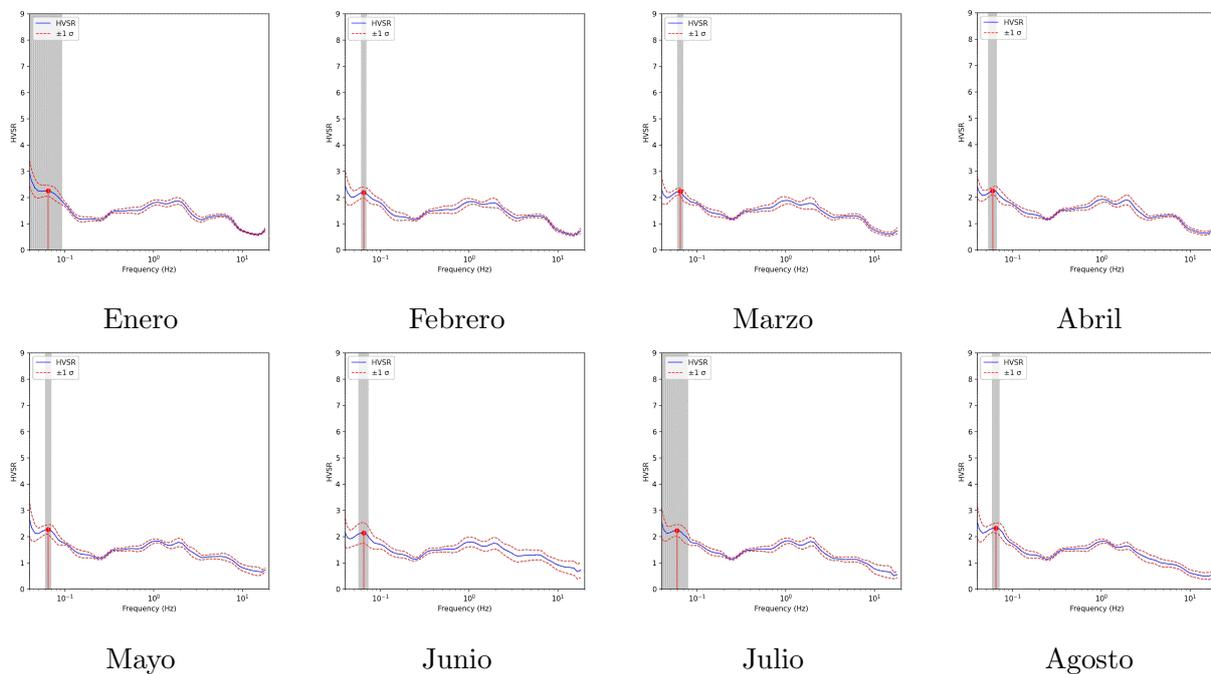


Figura 4.13: Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación GO10 durante el 2013. En esta figura se eligió destacar el pico de menor frecuencia que no cumple con suficientes criterios de claridad pero que tiene una amplitud mayor a 2. Se considera que su permanencia en el tiempo y su amplitud son indicios de una probable fuente en un reflector profundo, por lo que no se descarta.

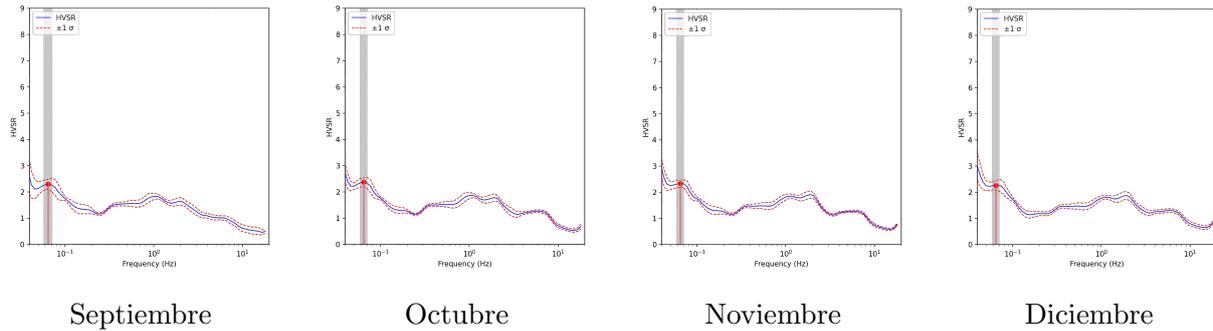


Figura 4.13: (continuación) Resultados mensuales de las curvas H/V de la estación GO10 durante el 2013. En esta figura se eligió destacar el pico de menor frecuencia que no cumple con suficientes criterios de claridad pero que tiene una amplitud mayor a 2. Se considera que su permanencia en el tiempo y su amplitud son indicios de una probable fuente en un reflector profundo, por lo que no se descarta.

Por lo tanto, no es posible verificar si este máximo tiene un origen geológico ya que es un pico de poca claridad y no se encontró un pico cercano a esa frecuencia en la estación PARE. Sin embargo, se mantiene permanente a lo largo del año, lo que podría indicar la presencia de un reflector horizontal profundo cuya presencia no pudo ser confirmada con la técnica HVSR. Se recomienda realizar mediciones adicionales en esta zona para verificar resultados y tener una mejor comprensión del comportamiento de las curvas.

## 4.2. Inversión de curvas H/V

Realizar un estudio de inversión de curvas H/V tiene como objetivo localizar los reflectores responsables del efecto de sitio de la zona. Para ello es importante contar con curvas H/V confiables y con picos bien definidos.

De las diez estaciones cuyos datos fueron analizados, cuatro resultaron en curvas H/V planas (BETA, TRVA, VTDF y MG03), lo que sugiere la posible existencia de pequeños contrastes de impedancia en los suelos debajo de ellas que no son detectables con la técnica HVSR. Los datos de la estación ELCA mostraron una fuerte influencia industrial, por lo que sus curvas H/V no fueron aptas para inversión. Las curvas H/V obtenidas para las estaciones PARE y GO10 mostraron picos similares, los cuales insinuaban la posible existencia de una variación lateral de velocidad. Además, el máximo de baja frecuencia de la estación GO10 demostró pocos criterios de claridad, por lo que no fue posible determinar un origen certero. Lo mismo ocurrió para el pico de frecuencia alta observado en la estación DSPA, el cual no cumplió con suficientes criterios de claridad como para

considerarlo en un estudio de inversión.

Por otro lado, las estaciones MG01 y MG02 mostraron curvas confiables, con picos claros y estables durante el año seleccionado. Estos resultados indican que las curvas H/V no fueron influenciadas por fenómenos atmosféricos ni industriales y que la estructura cortical del lugar es tal que define curvas H/V de calidad suficientemente alta, por lo cual son aptas para invertir.

Para la resolución del problema inverso se utilizó el software *Dinver*, mencionado anteriormente. El modelo inicial ingresado, el cual posteriormente fue modificado de manera iterativa, se obtuvo a partir de la recopilación de información de estudios geológicos en zonas cercanas a cada estación. Además, se pudo determinar una estimación preliminar de la profundidad del horizonte causante de los picos de frecuencia, basándose en estudios de inversión del método HVSR. En el trabajo de Gosar y Lenart (2010) se publicó una comparación de las relaciones potenciales obtenidas en diferentes estudios de inversión (Figura 4.14). Las relaciones graficadas muestran una tendencia común, la cual permite obtener un primer estimativo de profundidades según la frecuencia del pico de la curva H/V.

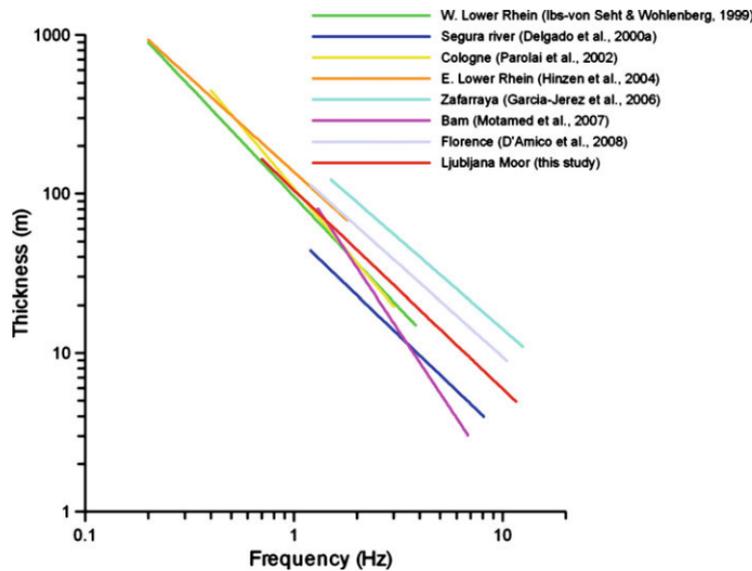


Figura 4.14: Comparación de la relación potencial entre la frecuencia fundamental y el espesor de los sedimentos para diferentes cuencas sedimentarias (Gosar y Lenart, 2010). Cada línea indica el resultado obtenido siguiendo los parámetros de cada trabajo. Estas relaciones permiten obtener un primer estimativo de profundidades según frecuencias fundamentales.

## Estación MG01

Los datos de la estación MG01 mostraron claridad y permanencia a lo largo del año, con un pico estable de frecuencia  $f \approx 1.037$  Hz (Figura 4.15), el cual se interpreta como la frecuencia fundamental del sitio. Esta frecuencia revela que el reflector que le dio origen es somero. Además, según Gosar y Lenart (2010), la relación potencial entre la frecuencia fundamental y el espesor de los sedimentos (Figura 4.14) indica que una frecuencia cercana a 1 Hz se corresponde con un horizonte en profundidades cercanas a 100 metros.

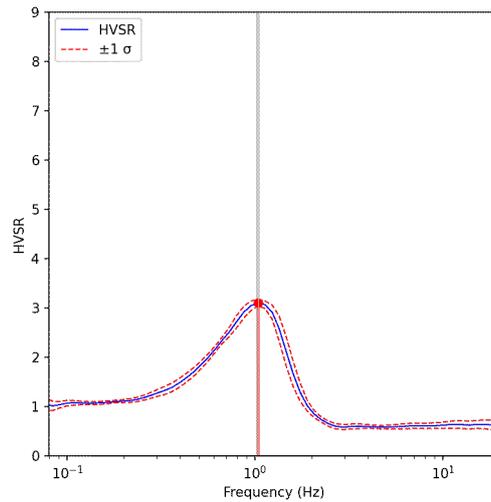


Figura 4.15: Curva H/V obtenida con los datos del mes de julio del 2016 en la estación MG01. El pico observado es claro y confiable. Al ser de frecuencia mayor a 1 Hz, indica la presencia de un reflector somero.

En el trabajo publicado por Menichetti et al. (2008) se muestra una sección geológica con orientación NS cercana a la estación MG01, obtenida de la combinación de datos de varios métodos de prospección geofísicos. En el mapa inferior de la Figura 4.16 se indica con color rojo el segmento de la sección considerada. La estación MG01 se encuentra en la Isla Navarino, la cual se caracteriza por la presencia de fallas de rumbo con tendencia E-O asociadas a varias fallas normales. Los planos de falla de estas estructuras inclinan con ángulo bajo y se superponen a los corrimientos con vergencia hacia el norte. El recuadro rojo en la Figura 4.16 destaca en el perfil la zona a invertir, en la cual se aprecia una secuencia sedimentaria con un espesor que supera el kilómetro.

Por su parte, Buffoni et al. (2018) realizaron un estudio de inversión de velocidades de onda Rayleigh con datos de una estación cercana a MG01. Los modelos iniciales de velocidades de ondas P y S sirvieron de referencia para el planteo de la inversión de curvas H/V en MG01.

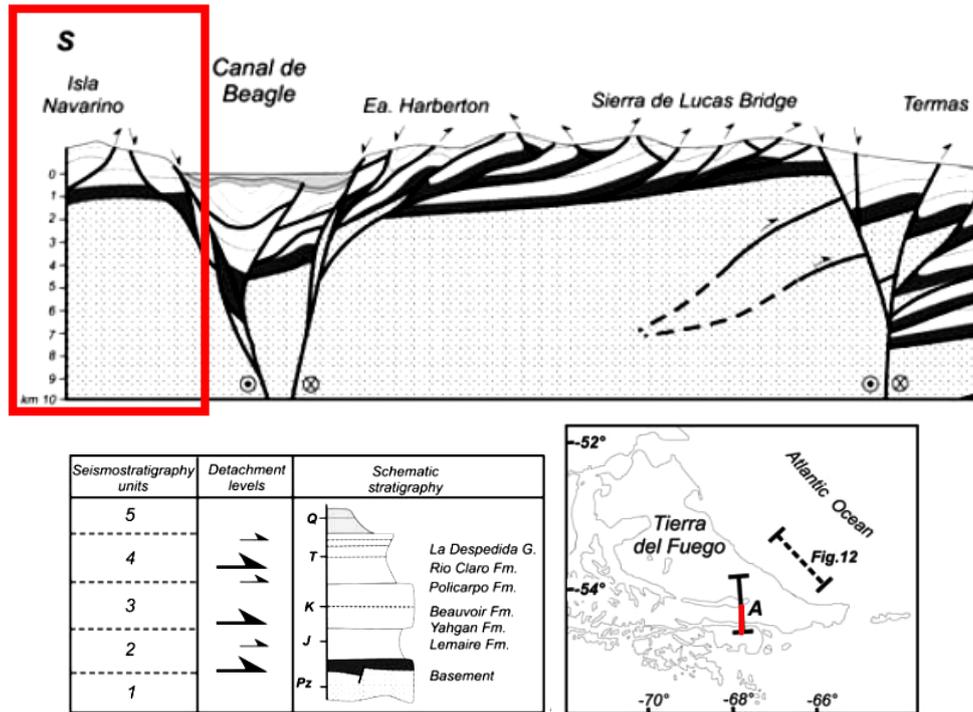


Figura 4.16: Recorte de perfil estructural extraído de Menichetti et al. (2008). La línea roja en el mapa inferior de Tierra del Fuego muestra la zona del perfil recortada, mientras que el recuadro rojo en el perfil resalta la zona de interés. La estación MG01 se encuentra sobre la Isla Navarino, muy cercana a la línea del perfil.

Considerando los trabajos de Gosar y Lenart (2010), Menichetti et al. (2008) y Buffoni et al. (2018), se crearon una serie de modelos iniciales de velocidades para la inversión. Se consideró una profundidad máxima de 1 km, con capas horizontales uniformes. Se especificaron las velocidades de ondas P y S para cada capa, asumiendo un aumento de la velocidad con la profundidad. Los modelos se diferenciaron por la variedad de espesores y velocidades en la serie de capas.

En particular para el modelo N°7 (Figura 4.17) se consideraron capas horizontales de 50 metros hasta los 300 metros de profundidad, capas de 100 metros hasta los 600 metros de profundidad y dos capas de 200 metros hasta llegar al kilómetro de profundidad. El error mínimo de ajuste luego de la primera iteración con *Dinver* fue de 0.1275.

De manera similar se planteó el modelo N°8, el cual difiere del modelo anterior en los primeros 100 metros, donde se consideraron cinco capas de 20 metros de espesor (Figura 4.17). Luego de su primera iteración en *Dinver*, se obtuvo un error mínimo de 0.1262.

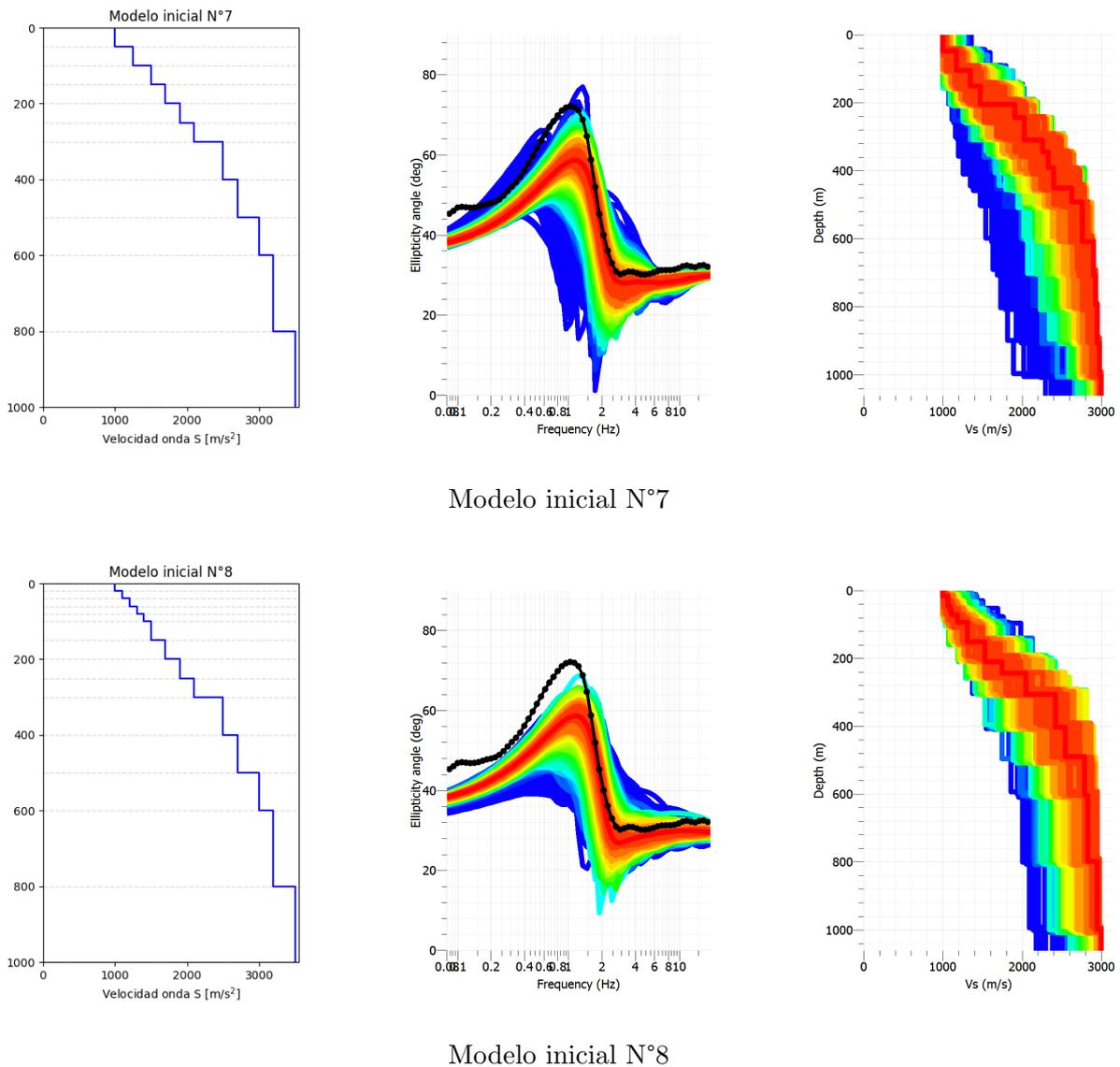


Figura 4.17: Modelos iniciales de velocidades para la inversión de la curva H/V de la estación MG01. En la fila superior se muestra el modelo inicial N°7 ingresado y la serie de modelos obtenidos con el software *Dinver*. En la fila inferior se muestran los gráficos correspondientes al modelo inicial N°8. La curva negra muestra la curva de elipticidad equivalente a la curva H/V ingresada, mientras que la escala de colores indica con rojo los modelos con menor error, y con azul aquellos con mayor error.

Luego de modificar los modelos de manera iterativa, se obtuvieron modelos finales de velocidades de onda S cuyos errores disminuyeron significativamente. El error del modelo N°7 se redujo a 0.076, mientras que el error del modelo N°8 fue de 0.0421 (Figura 4.18). Ambos resultados muestran un aumento significativo de la velocidad a una profundidad cercana a 120 metros, demostrando la presencia de un horizonte con alto contraste

de impedancia debajo de la estación. Este resultado coincide con lo esperado según la bibliografía detallada anteriormente.

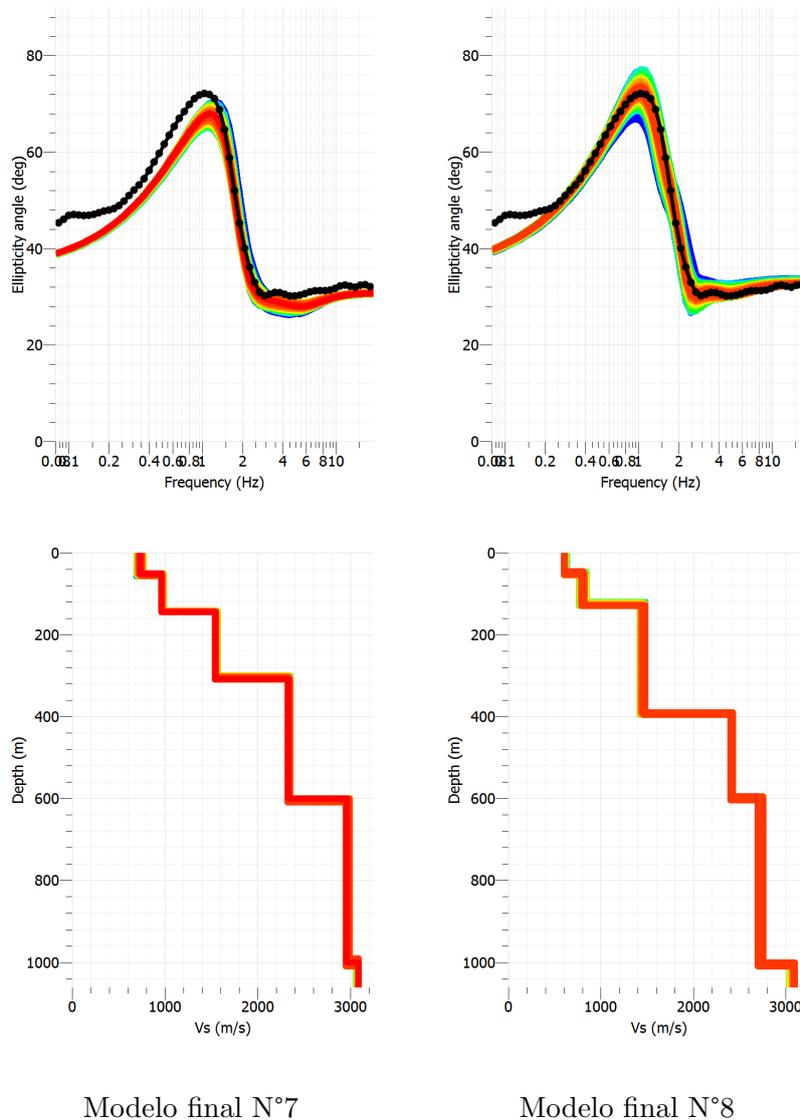


Figura 4.18: Resultados finales de la inversión de curvas H/V para la estación MG01. La iteración de ambos modelos redujeron el error significativamente, corroborando la presencia de un horizonte con alto contraste de impedancia a una profundidad de 120 metros.

### Estación MG02

La estación MG02 se encuentra al norte de la Isla de Tierra del Fuego. El cálculo de la relación HVSR durante los meses de 2019 dieron como resultados curvas H/V con un pico permanente en  $f_0 \approx 0.109$  Hz (Figura 4.19). Debido a la claridad y estabilidad del máximo de las curvas, se determinó que la frecuencia fundamental del sitio es  $f_0 = 0.109$  Hz.

Seguindo los resultados de Gosar y Lenart (2010), es de esperar que exista un contraste de impedancia a profundidades cercanas a los 1000 metros que se corresponda con esa frecuencia  $f_0$ .

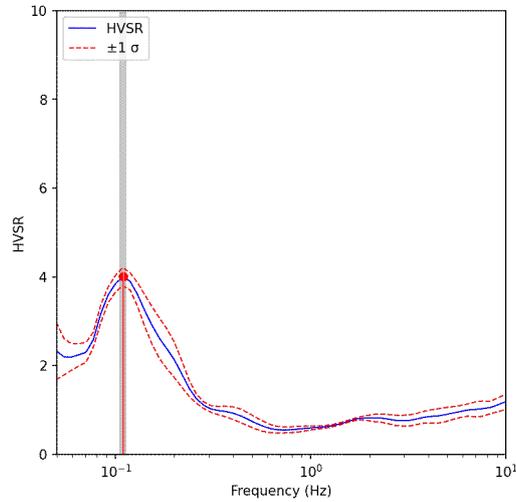


Figura 4.19: Resultado de la relación HVSR para los datos del mes de abril de 2019 de la estación MG02. Se obtuvo un máximo claro y estable para una frecuencia menor a 1 Hz, lo cual indica la presencia de un reflector a grandes profundidades.

En el trabajo publicado por Miller et al. (2022) se realizó un estudio de la Cuenca Austral, en la cual se encuentra la estación MG02. En él, se obtuvieron cuatro transectas de la región, de las cuales una resultó cercana a la estación. Se extrajo un segmento de la transecta más cercana (Figura 4.20), donde se aprecian tres primeras capas que corresponden a sedimentos del Mioceno hasta el Oligoceno Inferior.

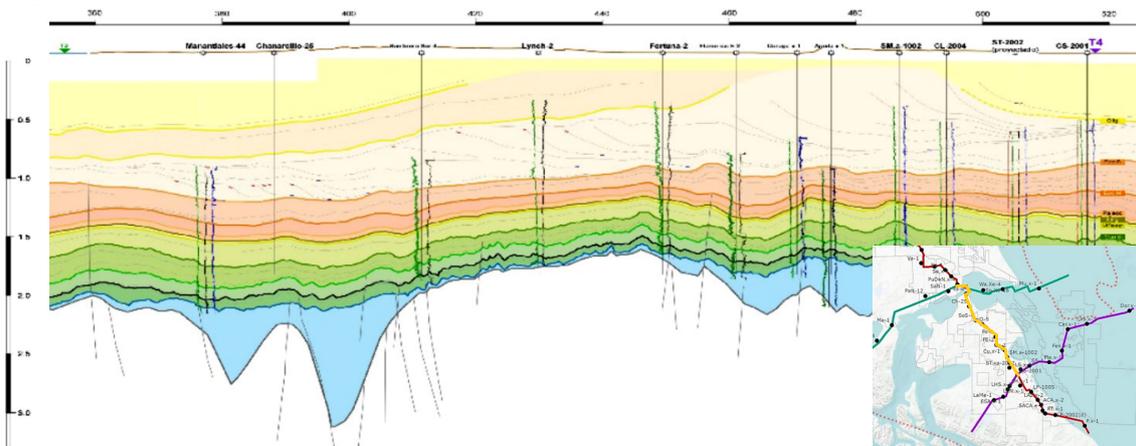


Figura 4.20: Recorte de transecta extraída de Miller et al. (2022). La línea amarilla en el mapa indica el segmento de la transecta recortado, el cual es cercano a la estación MG02. Escala vertical en tiempo doble (TWT).

En conjunto, las tres capas de gran espesor alcanzan grandes profundidades, mientras que las capas antiguas que se encuentran debajo son más angostas. Además, en el mismo trabajo se aclara que la capa del Oligoceno Inferior (capa de color más claro) alcanza un espesor aproximado de 400 metros, información que resulta útil para la creación del modelo de capas para la inversión

Considerando la información geológica de la zona y el estimativo de profundidad del reflector a partir de la frecuencia  $f_0$ , se inició el proceso de inversión de curvas H/V con varios modelos de velocidades de onda S. En particular, dado que el comportamiento de las curvas H/V mensuales se mantiene a lo largo del año estudiado, se realizó la inversión para la curva H/V del mes de abril de 2019 (Figura 4.19), con un modelo inicial de capas horizontales cuyas velocidades de onda S aumentaban con la profundidad. El modelo de la Figura 4.21 muestra una serie de capas horizontales cada 100 metros hasta una profundidad de 500 metros. El espesor de las capas inferiores aumenta hasta llegar a una profundidad de 3000 metros. La primera iteración de este modelo en *Dinver* resultó en un error de ajuste mínimo de 0.1602.

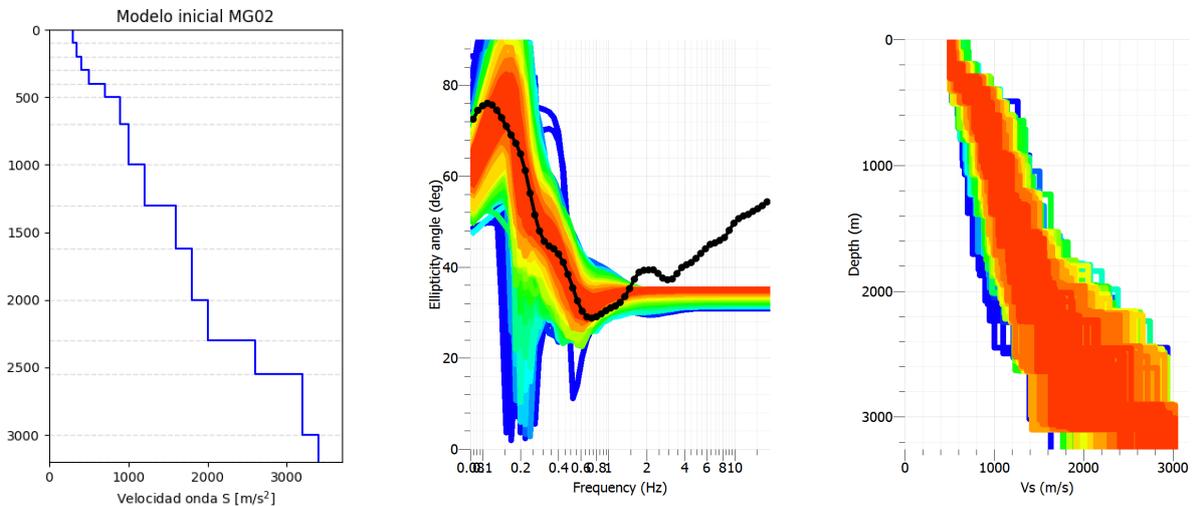


Figura 4.21: Modelo inicial de velocidades de onda S para la inversión de curvas H/V de la estación MG02. Los colores indican el valor del error para cada modelo evaluado en la primer iteración, siendo rojo los de menor valor y azul aquellos con mayor error.

Terminado el proceso iterativo se obtuvo un modelo final de velocidades de onda S con un error de ajuste de 0.1555, levemente inferior al inicial (Figura 4.22). En el modelo final se destaca la presencia de un horizonte con un alto contraste de impedancia a una profundidad aproximada de 900 metros, donde la velocidad aumenta rápidamente de 500

$\text{m/s}^2$  a  $1100 \text{ m/s}^2$ . Este resultado coincide con lo esperado según la bibliografía detallada (Gosar y Lenart, 2010; Miller et al., 2022).

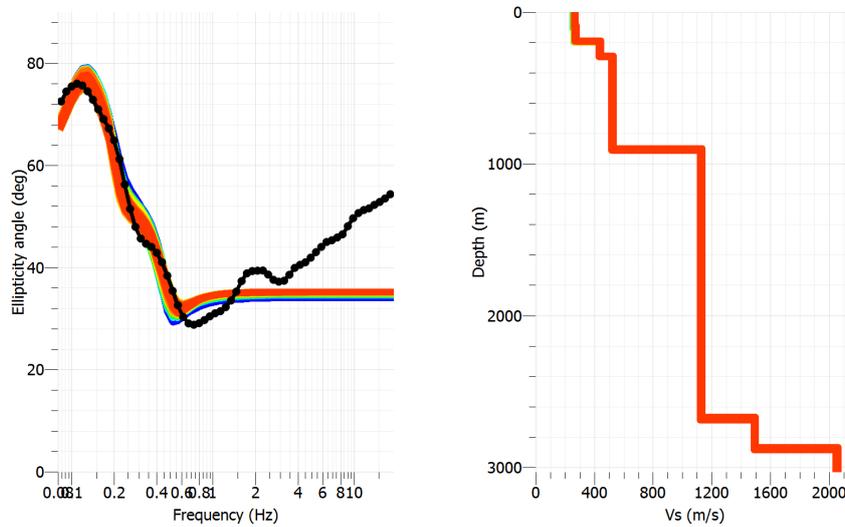


Figura 4.22: Resultado de la inversión de la curva H/V para el mes de abril de 2019 en la estación MG02. Se obtuvo un modelo de velocidad del subsuelo con un error mínimo de 0.1556. Se aprecia un reflector a 900 metros de profundidad donde existe un gran contraste de impedancia.

### 4.3. Resumen de resultados

Se aplicó la técnica HVSR para determinar las frecuencias fundamentales en diez estaciones ubicadas en Tierra del Fuego que permiten caracterizar el efecto de sitio en la región y se obtuvieron modelos de estructura sedimentaria debajo de dos estaciones mediante inversión.

Para el cálculo de las curvas H/V se implementaron dos softwares. Por un lado, se utilizó *Geopsy*, un software multiplataforma que permite el procesamiento de señales sísmicas de manera intuitiva y versátil. Los parámetros de procesamiento se ingresan de manera sencilla, teniendo una gran variedad de filtros para elegir, y la visualización del ventaneo seleccionado es instantánea. Además, permite modificar el aspecto de la curva H/V final, variando las escalas de los ejes y las escalas de colores. Esto lo convierte en una gran herramienta si se dispone de los registros sísmicos en las tres componentes.

Por su parte, *IRIS HVSR Station Toolbox* posee grandes ventajas en comparación a *Geopsy*. El uso de datos PSD de la plataforma IRIS permite un rápido procesamiento de señales, incluso en estaciones remotas. En este sentido supera a *Geopsy* ya que el usuario

puede reducir el tiempo de procesamiento al solicitar los datos del catálogo de IRIS. A su vez, es de fácil implementación, utilizando líneas de comando por terminal. Otra ventaja es la función de ranking de picos, la cual permite evaluar de manera instantánea los criterios de claridad de la curva H/V. En cambio, para *Geopsy* esto implica un cálculo extra mediante el uso de un software externo. Sin embargo, *IRIS HVSR Station Toolbox* es limitado en la cantidad de parámetros disponibles para el procesamiento, permitiendo elegir entre pocos tipos de filtrado.

Durante este trabajo se tuvo en cuenta el tiempo de procesamiento, ocupando la misma cantidad de tiempo calcular la relación H/V para los registros de siete estaciones con *IRIS HVSR Station Toolbox* que el cálculo con datos de tres estaciones con *Geopsy*. Debido a esto, se considera el software de IRIS como una herramienta más eficaz en términos de aplicabilidad y tiempo de procesamiento.

La implementación de la técnica HVSR concluyó en resultados satisfactorios. A pesar de la falta de datos para algunos meses, la aplicación de la técnica no presentó mayores inconvenientes, obteniéndose curvas H/V mensuales para los registros de diez estaciones en la Isla de Tierra del Fuego y sus alrededores.

De las diez estaciones utilizadas, seis se encuentran dentro de la Isla de Tierra del Fuego (Figura 3.1). Para las estaciones VTDF, BETA y TRVA se obtuvieron curvas H/V planas a lo largo de todo el año, sin mostrar dependencia de fenómenos atmosféricos, lo que indica que estas estaciones se encuentran sobre suelos sin grandes contrastes de impedancia.

En la estación ELCA se obtuvieron curvas H/V cuyos comportamientos difieren de manera significativa a lo largo del día. A su vez, se encontraron diferencias en las curvas para días laborales y no laborales. Luego de un análisis más detallado de los espectros de los datos originales, se concluyó que los máximos observados en las curvas H/V tuvieron un origen industrial, por lo que los resultados para esta estación fueron descartados.

Las curvas H/V de la estación DSPA mostraron picos permanentes pero con pocos criterios de claridad satisfactorios. La presencia de los picos a lo largo del año indica que esta estación no es sensible a efectos meteorológicos. En vista de lo anterior, el máximo de alta frecuencia no pudo ser ignorado, aunque tampoco se recomienda realizar interpretaciones cuantitativas con picos pocos claros. Debido a esto se concluyó que las curvas podrían evidenciar un reflector somero, sin embargo la técnica HVSR no fue lo suficientemente resolutiva para verificarlo.

La estación MG02, que se encuentra en el extremo norte de la Isla, presentó curvas H/V

mensuales con un máximo estable y permanente en la frecuencia  $f \approx 0.109$  Hz. Al cumplir con los seis criterios de claridad, se concluyó que el pico de las curvas es un indicativo del efecto de sitio en la zona, siendo esa  $f_0$  la frecuencia fundamental del sitio. Las curvas fueron luego invertidas, obteniendo un modelo de velocidades con error de ajuste bajo, que demostró la presencia de un horizonte con un gran contraste de impedancia a 900 metros de profundidad.

Estas últimas dos estaciones, DSPA y MG02, se encuentran dentro de la zona de antepaís de Magallanes en la Cuenca Sedimentaria Austral, mostraron ser indicativas de posibles reflectores someros y profundos, respectivamente. Un análisis más exhaustivo en la región, junto con la implementación de otras técnicas de prospección geofísica, podría resultar en un modelo detallado de la secuencia sedimentaria de la cuenca.

Para la estación MG03, ubicada en una isla cercana, las curvas H/V resultaron planas, indicando que su subsuelo no cuenta con grandes contrastes de impedancia.

Para las estaciones GO10 y PARE (a 11 km de distancia), ambas ubicadas en Punta Arenas, se analizaron y compararon las curvas H/V, encontrando una relación entre el pico claro de la estación PARE y dos picos de baja amplitud de la estación GO10, sugiriendo la presencia de una variación lateral subterránea. Por otro lado, el máximo de baja frecuencia de la estación GO10 no mostró dependencia de efectos atmosféricos debido a su permanencia a lo largo del año. Sin embargo, no fue posible determinar el origen de este pico dado que verificaba pocos criterios de claridad, por lo que se concluyó que la técnica no fue resolutive para esas frecuencias.

Por último, los datos de la estación MG01, ubicada en la Isla Navarino al sur de la Isla de Tierra del Fuego, resultaron en curvas H/V estables, con un pico claro y permanente a lo largo del año. Se interpretó que el efecto de sitio de la zona se corresponde con el máximo de la curva, siendo la frecuencia fundamental del sitio  $f_0 \approx 1.037$  Hz. Según Gosar y Lenart (2010) este valor es indicador de un horizonte a profundidades cercanas a 100 metros. Luego del proceso de inversión de la curva H/V, se obtuvo un modelo de velocidad de onda S para los sedimentos que muestra un claro contraste de impedancia a 120 metros de profundidad.

# Capítulo 5

## Conclusión

Se analizó la relación HVSR en diez estaciones ubicadas en la Isla de Tierra del Fuego y sus alrededores, obteniendo curvas H/V con diferentes orígenes, reafirmando ser una alternativa eficaz para la determinación de estructuras corticales debajo de estaciones sismológicas. Este trabajo representa el primer estudio sobre el efecto de sitio en esta región, marcando un avance en la investigación del riesgo sísmico en la Isla.

Las curvas H/V calculadas fueron evaluadas con los criterios propuestos por el grupo SESAME, corroborando su estabilidad. A su vez, los máximos de las curvas debieron cumplir los criterios de estabilidad y claridad para ser interpretados como estimativos de la frecuencia fundamental del sitio. Para el cálculo de las distintas curvas se implementaron dos softwares de acceso libre, *Geopsy* y *IRIS HVSR Station Toolbox*. Este último demostró ser una herramienta más eficaz en términos de aplicabilidad y tiempo de procesamiento.

La estación ELCA mostró estar influenciada por algún tipo de maquinaria, generando máximos de origen industrial. Cuatro estaciones, BETA, TRVA, VTDF y MG03, todas cercanas a la traza de la falla Magallanes-Fagnano, mostraron comportamientos estables con curvas H/V con tendencias plana a lo largo de todo el año, lo cual indica la falta de grandes contrastes de impedancia en los suelos debajo de las estaciones. La comparación de curvas H/V de las estaciones GO10 y PARE evidenció una posible variación lateral en el subsuelo de la ciudad Punta Arenas en Chile.

Los resultados para las estaciones chilenas MG01 y MG02 demostraron la utilidad de la técnica HVSR. En ambas estaciones se obtuvieron curvas H/V con picos claros que permitieron estimar la frecuencia fundamental en los subsuelos de las estaciones. Por inversión, se calcularon modelos de velocidad de ondas S para cada estación, verificando la presencia de altos contrastes de impedancia y cómo su profundidad se relaciona con la frecuencia fundamental.

---

*Esta tesis formó parte de una Beca de grado del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) entre el 1/9/2022 y el 31/8/2023, enmarcada en los proyectos “Nuevas Tecnologías para el Procesamiento de Señales Geofísicas. Monitoreo y Resultados en Sudamérica” y “NOISY: avances en el análisis e interpretación de señales de moNitoreo vOlcánIco, Sismicidad y raYos”, ambos acreditados en el Programa Nacional de Incentivos a la Docencia e Investigación*

# Bibliografía

- Ammirati, J. B., M. C. Flores, y S. Ruiz, 2020, Seismicity along the Magallanes-Fagnano fault system: *Journal of South American Earth Sciences*, **103**.
- Arai, H., y K. Tokimatsu, 2004, S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**, 53–63.
- Asten, M., 1978, Geological control of the three-component spectra of Rayleigh-wave microseisms: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **68**, 1623–1636.
- Asten, M., y J. Henstridge, 1984, Arrays estimators and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins: *Geophysics*, **49**, 1828–1837.
- Bahavar, M., Z. J. Spica, F. J. Sánchez-Sesma, C. Trabant, A. Zandieh, y G. Toro, 2020, Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr) IRIS Station Toolbox: *Electronic Seismologist*, **XX**, 1–11.
- Barrientos, S., y C. Team, 2018, The seismic network of Chile: *Seismological Research Letters*, **89**, 467–474.
- Bollini, M. C., 2021, Modelado de fuente sísmica mediante inversión de forma de onda. Aplicación en Tierra del Fuego: Tesis doctoral en Geofísica <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/124830>.
- Bonnefoy-Claudet, S., F. Cotton, y P. Y. Bard, 2006, The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review: *Earth-Science Reviews*, **79**, 205–227.
- Bonnefoy-Claudet, S., A. Kohler, C. Cornou, M. Wathelet, y P. Y. Bard, 2008, Effects of Love waves on microtremor H/V ratio: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**, 288–300.
- Buffoni, C., N. C. Sabbione, G. Connon, y J. L. Hormaechea, 2009, Localización de hipocentros y determinación de su magnitud en Tierra del Fuego y zonas aledañas: *Geoacta*, **34**, 75–85.
- Buffoni, C., M. Schimmel, N. C. Sabbione, M. L. Rosa, y G. Connon, 2018, Rayleigh waves from correlation of seismic noise in Great Island of Tierra del Fuego, Argentina:

- Constraints on upper crustal structure: *Geodesy and Geodynamics*, **9**, 2–12.
- , 2019, Crustal structure beneath Tierra del Fuego, Argentina, inferred from seismic P-wave receiver functions and ambient noise autocorrelations: *Tectonophysics*, 41–53.
- Diraison, M., P. R. Cobbold, D. Gapais, y E. A. Rossello, 1997, Magellan strait: Part of a Neogene rift system: *Geology*, **25**, 703–706.
- Duca, L., 2017, Estructura sísmica de la cuenca Austral a partir de la velocidad de fase de ondas superficiales: Tesis de grado. Universidad Nacional de La Plata.
- Duca, L., M. Rosa, y G. Flores, 2018, Seismic structure of the Austral basin, Patagonia, using surface wave phase velocity: *Seismological Research Letters*, **89**, 717–966.
- Duca, L., M. Rosa, y N. Sabbione, 2021, Estructura cortical de la Cuenca Austral, Patagonia: Libro de resúmenes de la XXIX Reunión Científica de la AAGG.
- Febrer, J., M. Plasencia, y N. Sabbione, 2000, Sismicidad local registrada en la estación de banda ancha de Bahía Lapataia (Tierra del Fuego): *Actas de la XX Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas*, 80–84.
- Febrer, J. M., 2002, La red ASAIN de observación sismológica en Antártida II. Sismicidad en Tierra del Fuego: *XXI Reunión Científica AAGG*, 273–279.
- Finessi, M., 2020, software libre “HVTEST V 1.0.6”: <https://github.com/theking0/HVTEST.git>.
- Fäh, D., F. Kind, y D. Giardini, 2001, A theoretical investigation of average H/V ratios: *Geophysical Journal International*, **145**, 535–549.
- Gabas, A., A. Macau, B. Benjumea, F. Bellmunt, S. Figueras, y M. Vila, 2014, Combination of geophysical methods to support urban geological mapping: *Surveys in Geophysics*, **35**, 983–1002.
- Ghiglione, M. C., J. Quinteros, D. Yagupsky, P. Bonillo-Martínez, J. Hlebszevtich, V. A. Ramos, G. Vergani, D. Figueroa, S. Quesada, y T. Zapata, 2010, Structure and tectonic history of the foreland basins of southernmost South America: *Journal of South American Earth Sciences*, **29**, 262–277.
- Gosar, A., y A. Lenart, 2010, Mapping the thickness of sediments in the Ljubljana Moor basin (Slovenia) using microtremors: *Bulletin of Earthquake Engineering*, **8**, 501–518.
- Gutenberg, B., 1958, Microseisms: *Advances in Geophysics*, **5**, 53–92.
- Herak, M., 2008, ModelHVSR: a Matlab tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise: *Computers and Geosciences*, **34**, 1514–1526.
- Ibs-von Seht, M., y J. Wohlenberg, 1999, Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**, 250–259.
- Konno, K., y T. Ohmachi, 1998, Ground-motion characteristics estimated from spectral

- ratio between horizontal and vertical components of microtremor: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88**, 228–241.
- Kraemer, P. E., 2003, Orogenic shortening and the origin of the Patagonian orocline: *Journal of South American Earth Sciences*, **15**, 731–748.
- Lermo, J., y F. J. Chávez-García, 1994, Are microtremors useful in site response evaluation?: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**.
- Malischewsky, P. G., y F. Scherbaum, 2004, Love's formula and H/V-ratio (ellipticity) of Rayleigh waves: *Wave Motion*, **40**, 57–67.
- Marcellini, A., 2006, Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: *Interpretation: A Journal of Bible and Theology*, 1–69.
- McNamara, D. E., y R. I. Boaz, 2019, Visualization of the seismic ambient noise spectrum: *Seismic ambient noise*, 1–29.
- Mendoza, L., R. Perdomo, J. L. Hormaechea, D. Del Cogliano, M. Fritsche, A. Richter, y R. Dietrich, 2011, Present-day crustal deformation along the Magallanes-Fagnano fault system in Tierra del Fuego from repeated GPS observations: *Geophysical Journal International*, **184**, 1009–1022.
- Mendoza, L. P. O., A. Richter, E. R. Marderwald, J. L. Hormaechea, G. Connon, M. Scheinert, R. Dietrich, y R. A. Perdomo, 2022, Horizontal and vertical deformation rates linked to the Magallanes-Fagnano fault, Tierra del Fuego: Reconciling geological and geodetic observations by modeling the current seismic cycle: *Tectonics*, **41**.
- Menichetti, M., E. Lodolo, y A. Tassone, 2008, Structural geology of the Fuegian Andes and Magallanes fold-and-thrust belt: *Geologica Acta*, **6**, 19–42.
- Mihaylov, D., M. H. El Naggar, y S. Dineva, 2016, Separation of high- and low-level ambient noise for HVSR: Application in city conditions for Greater Toronto area: *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 106, No. 5, pp. 2177–2184, October 2016.
- Miller, M., M. Rivero, D. Jait, J. Rangel Pinto, R. Domínguez, O. Berdini, D. González, F. Mas Cattapan, M. Santiago, J. M. Álvarez Cerimedo, R. Adaros Carcamo, A. Villareal, C. Mairal, M. F. Varela, D. Rojas Arce, L. Loss, N. Seoane, M. Cevallos, y C. Rojas, 2022, El relleno de Cuenca Austral-Magallanes revelado a través de cuatro transectas regionales: *XI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, 339–373.
- Mucciarelli, M., y M. R. Gallipoli, 2001, A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique: *Bolletino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, **42**, 255–266.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface: *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, **30**, 25–33.

- Olivero, E. B., y Malumian, 1999, Eocene stratigraphy of southeastern Tierra del Fuego Island, Argentina: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **83**.
- Olivero, E. B., y D. R. Martinioni, 2001, A review of the geology of the Argentinian Fuegian Andes: *Journal of South American Earth Sciences*, **14**, 175–188.
- Parolai, S., P. Bormann, y C. Milkereit, 2002, New relationships between Vs, thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany): *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**, 2521–2527.
- Plasencia, M., G. Connon, J. L. Hormaechea, y N. C. Sabbione, 2002, Determinación preliminar de epicentros registrados en la estación sismológica DSPA (Despedida), Provincia de Tierra del Fuego: XXI Reunión Científica AAGG, 285–289.
- Richter, A., A. Groh, M. Horwath, E. Ivins, E. Marderwald, J. L. Hormaechea, R. Perdomo, y R. Dietrich, 2019, The rapid and steady mass loss of the Patagonian icefields throughout the GRACE era: 2002-2017: *Remote Sensing*, **11**.
- Richter, A., E. Ivins, H. Lange, L. Mendoza, L. Schröder, J. L. Hormaechea, G. Casassa, E. Marderwald, M. Fritsche, R. Perdomo, M. Horwath, y R. Dietrich, 2016, Crustal deformation across the Southern Patagonian Icefield observed by GNSS: *Earth and Planetary Science Letters*, **452**, 206–215.
- Sabbione, N. C., G. Connon, J. L. Hormaechea, y M. L. Rosa, 2007, Estudio de sismicidad en la provincia de Tierra del Fuego, Argentina: *Geoacta*, **32**, 41–50.
- Shearer, P. M., 2009, *Introduction to seismology*, second edition: Cambridge University Press.
- Stein, S., y M. Wysession, 2003, *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*: Blackwel Publishing Ltd.
- Sue, C., y M. C. Ghiglione, 2016, Wrenching tectonism in the Southermost Andes and the Scotia Sea constrained from fault kinematic and seismotectonic overviews: *Springer Earth System Sciences*.
- Tuan, T., F. Scherbaum, y P. Malischewsky, 2011, On the relationship of peaks and troughs of ellipticity (H/V) of Rayleigh waves and the transmission response of single layer over half-space models: *Geophysical Journal International*, **184**, 793–800.
- Tuan, T. T., P. C. Vinh, P. Malischewsky, y A. Aoudia, 2015, Approximate formula of peak frequency of H/V ratio curve in multilayered model and its use in H/V ratio technique: *Pure and Applied Geophysics*, **173**, 487–498.
- Udías, A., 1999, *Principles of seismology*: Cambridge University Press.
- Van der Baan, M., 2009, The origin of SH-wave resonance frequencies in sedimentary

layers: *Geophysical Journal International*, **178**, 1587–1596.

Wathelet, M., J.-L. Chatelain, C. Cornou, G. Di Giulio, B. Guillier, M. Ohrnberger, y A. Savvaidis, 2020, Geopsy: A user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing: *Seismological Research Letters*, **20**.