

Determination of the spectral relationship in seismological stations located in the Paraná, Chaco-Paraná, and Pantanal basins

Victoria Frickel Critto^{1*} , María Laura Rosa^{1,2} 

Abstract Ambient noise data from 45 stations of the BRASIS network were analyzed, and the spectral ratio between horizontal and vertical amplitudes as a function of frequency was calculated, allowing site effects to be analyzed. The H/V curves were obtained using the Nakamura technique, which enables the evaluation of soil characteristics. This study allows us to improve the resolution of shallow structures in the region's models, showing a better spatial correlation with known tectonic features. By analyzing these curves, information was obtained on the contact between the basement and the underlying sedimentary basin, and for some stations, a shallower contrast was observed. In general, for stations located on the basins, lower fundamental frequency values were obtained, while for stations located at the basin edges, the frequencies showed high values indicative of firm rock. In the stations located in the Chaco-Paraná basin, the fundamental frequency was determined, representing the response to the contact between the basin and the basement, and a second contrast was observed, possibly linked to a volcanic stratum from the Upper Jurassic-Middle Cretaceous at a depth of 550 meters. In the Pantanal basin, the fundamental frequency presented a similar value. Additionally, two impedance contrasts were observed, the most superficial linked to the interface between an Aeolian deposit from the Pleistocene-Holocene, and an older unit associated with lateral migration channels. These results represent a progress in the seismological knowledge of the Chaco-Paraná, Paraná, and Pantanal basins.

Keywords HVSR, fundamental frequency, site effect, seismic noise, sedimentary basins.

Determinación de la relación espectral en estaciones sismológicas ubicadas en las cuencas Paraná, Chaco-Paraná y Pantanal

Resumen Se analizaron datos de ruido ambiente de 45 estaciones de la red BRASIS y se calculó la relación espectral entre las amplitudes horizontal y vertical en función de la frecuencia, permitiendo analizar efectos de sitio. Las curvas H/V se obtuvieron aplicando la técnica de Nakamura, que posibilita evaluar características del suelo. Este estudio permite mejorar la resolución de las estructuras superficiales en los modelos de la región mostrando así una mejor correlación espacial con las características tectónicas conocidas. Mediante un análisis de estas curvas, se obtuvo información del contacto entre el basamento y la cuenca sedimentaria subyacente, y para algunas estaciones se observó un contraste más somero. En general, para las estaciones ubicadas sobre las cuencas se obtuvieron valores bajos de la frecuencia fundamental, mientras que para estaciones ubicadas en los bordes de cuenca las frecuencias presentaron valores altos, indicativos de roca firme. En las estaciones ubicadas en la cuenca Chaco-Paraná se determinó la frecuencia fundamental correspondiente a la respuesta al contacto de la cuenca con el basamento, y se observó un segundo contraste, vinculado posiblemente a un estrato volcánico del Jurásico superior-Cretácico medio a 550 m de profundidad. En la cuenca Pantanal, la frecuencia fundamental presentó un valor similar. Además, se observaron dos contrastes, el más superficial vinculado con la interfaz entre un depósito eólico del Pleistoceno-Holoceno, y una unidad más antigua vinculada con canales laterales de migración. Estos resultados nos permiten avanzar en el conocimiento sismológico de las cuencas Chaco-Paraná, Paraná y Pantanal.

Palabras clave HVSR, frecuencia fundamental, efecto de sitio, ruido sísmico, cuencas sedimentarias.

INTRODUCCIÓN

La observación de las ondas sísmicas es fundamental para el conocimiento del interior de la Tierra. Sin embargo, esto no implica que el análisis de ondas sea únicamente a través de la información que nos brindan los terremotos. Existen zonas con sismicidad baja a nula, en estos casos, registrar el ruido ambiente puede ser una herramienta eficaz para investigar la región.

El ruido sísmico se observa desde el principio de la sismología instrumental en el siglo XIX. Es un término genérico utilizado para denotar vibraciones ambientales del suelo causadas por fuentes tales como mareas, olas que azotan las costas, vientos, efectos del viento en árboles o edificios, maquinaria industrial, automóviles, trenes, o pasos humanos, etc. Se puede registrar en cualquier lugar independientemente de su sismicidad y tiene un contenido de frecuencias que va desde 10^{-3} Hz

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

² Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEOF), Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

* Contacto: vtfrickel@fcaglp.fcaglp.unlp.edu.ar

hasta 10^1 Hz (McNamara y Boaz, 2019). A partir de registros de ruido sísmico podemos aplicar la técnica HVRS (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), también llamada “Método de Nakamura”, la cual se basa en el análisis de la relación espectral del registro horizontal y vertical utilizando solamente un sismómetro-sismógrafo de tres componentes. La componente horizontal del movimiento del suelo se amplifica durante la propagación de ondas sísmicas cerca de la superficie, mientras que la amplificación en la componente vertical es relativamente pequeña. Por lo tanto, se supone que los picos en la curva HVSR están asociados con la estructura sísmica local de la estación (efecto de sitio), lo cual es una información sumamente valiosa para estudios de riesgo sísmico y microzonificación en áreas urbanas.

Aunque los antecedentes teóricos de la técnica inicialmente no estaban del todo claros (y aún existen controversias), su simplicidad y bajo costo es un aspecto muy atractivo (Mucciarelli et al. 2007). En este trabajo se busca estudiar las características de los sedimentos en las cuencas Chaco-Paraná, Paraná y Pantanal. Para ello, se utilizará la técnica anteriormente mencionada, donde se realizará el cálculo de las curvas H/V utilizando los registros de ruido sísmico de 45 estaciones de la red BRASIS (<https://moho.iag.usp.br/mda/>), a lo largo de un año entero.

REGIÓN DE ESTUDIO

Analizamos las cuencas sedimentarias Pantanal (PtB), Paraná (PrB) y Chaco-Paraná (ChB), las cuales se encuentran localizadas en Argentina, Uruguay, Brasil y Paraguay (Figura 1) (Rocha et al. 2019).

La cuenca Pantanal, de edad Cenozoica, es una depresión tectónicamente activa. Posee forma alargada y similar a un graben (Assine y Soares, 2004), con orientación predominante N-S (da Silveira et al. 2021). Está situada en la depresión del Alto Paraguay, la cual está localizada en el centro-oeste de Brasil, aunque también se extiende en Bolivia y Paraguay. Cuenta con una superficie de aproximadamente $150\,000\text{ km}^2$ y una topografía que varía de 80 a 200 m.

Mientras que la cuenca Paraná está ubicada principalmente al sur de Brasil, pero también se extiende en parte sobre Uruguay, Argentina y Paraguay, cubriendo un área total de $17\,000\,000\text{ km}^2$. Es una cuenca intracratónica, de forma elíptica alineada NNE-SSO, de la cual dos tercios de su superficie está cubierta por lavas basálticas del Mesozoico. Tiene un largo de aproximadamente 1750 km y 900 km de ancho, presentando espesores sedimentarios de aproximadamente 7000 m en el centro de la cuenca, justo debajo del río que le da nombre a la cuenca.

La última cuenca de estudio, la cuenca Chaco-Paraná, está localizada principalmente al noreste de Argentina y se extiende hasta la porción occidental del Uruguay. Es intracratónica con profundidades de hasta 5000 m y tiene una superficie de unos $500\,000\text{ km}^2$, siendo este un depocentro de forma elíptica con su eje principal orientado ENE-OSO.

METODOLOGÍA

El método H/V fue introducido por Nogoshi y Igarashi (1971) basándose en los estudios de Kanai y Tanaka (1961) y fue modificado posteriormente por Nakamura (1989). Esta técnica se basa en calcular la relación espectral de la componente horizontal y vertical del movimiento del suelo en registros sísmicos, que refleja principalmente la resonancia de la onda S en la capa superficial blanda (eliminando los efectos de las ondas superficiales). Por lo tanto, la curva HVSR proporciona una estimación consistente de la función de amplificación del sitio. El pico principal del espectro H/V corresponde a la frecuencia de resonancia fundamental (f_0) y depende del espesor del material y de la velocidad de ondas S. Es un método sencillo en cuanto a la recolección de datos y a su implementación en áreas de sismicidad moderada a baja, proporcionando información rápida sobre las características dinámicas del suelo y de las estructuras presentes.

Para calcular los espectros H/V se divide el registro, en este caso de ruido sísmico, en ventanas de tiempo con amplitud casi estacionaria, utilizando un algoritmo STA/LTA para eliminar ruidos transitorios

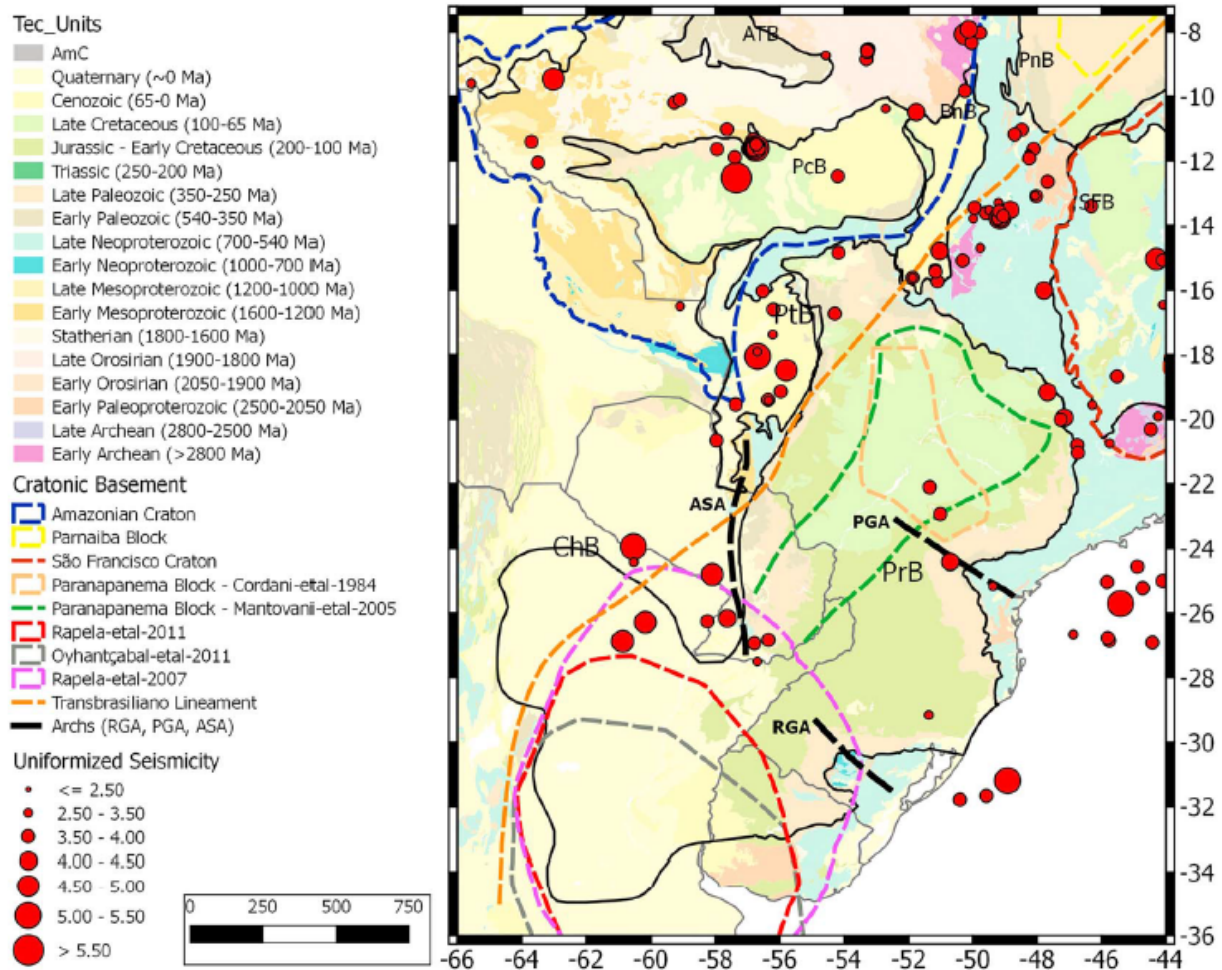


Figura 1. Mapa con la localización de las cuencas de la región. ATB, Cuenca Alto do Tapajós; PnB, Cuenca Parnaíba; PcB, Cuenca Parecis; BnB, Cuenca Banano; SFB, Cuenca São Francisco; PtB, Cuenca Pantanal; PrB Cuenca Paraná; ChB, Cuenca Chaco-Paraná. ASA, PGA y RGA (líneas negras discontinuas) corresponden al Arco de la Asunción, Arco Ponta Grossa y Arco Rio Grande, respectivamente. Extraído de Rocha et al. (2019).

asociados con fuentes antrópicas (tráfico, etc.). La longitud de la ventana seleccionada debe ser mayor que $10/f_0$, de manera que en la frecuencia de interés existen al menos 10 ciclos significativos en cada ventana (Marcellini, 2006). Se calculan los espectros de las tres componentes y su promedio vectorial en la horizontal, y se aplica un suavizado espectral para garantizar resolución uniforme en frecuencia. El resultado es el espectro promedio H/V y su desviación estándar, de donde se identifica la frecuencia de resonancia principal.

Nakamura (30 de enero al 4 de febrero de 2000) expresó el movimiento horizontal (H) y vertical (V) del suelo sobre una superficie libre, como la suma en el dominio de la frecuencia (Ritta et al. 2012), del movimiento de ondas de cuerpo que se propagan desde el basamento, junto con la contribución de ondas superficiales. En la Figura 2 se muestra un esquema de una cuenca sedimentaria. $H_f(\omega)$ y $V_f(\omega)$ son las transformadas de Fourier del movimiento horizontal y vertical en la superficie, respectivamente. Estos espectros no son útiles para identificar las frecuencias naturales de la cuenca porque contienen además las frecuencias dominantes de las fuentes que generaron las ondas (Ritta et al. 2012). Si se dispusiera de los espectros $H_b(\omega)$ y $V_b(\omega)$ correspondientes al basamento rocoso, las componentes horizontal $T_h(\omega)$ y vertical $T_v(\omega)$ de la función de transferencia entre el movimiento en la superficie y en el basamento serían:

$$T_h(\omega) = \frac{H_f(\omega)}{H_b(\omega)}, \quad T_v(\omega) = \frac{V_f(\omega)}{V_b(\omega)}, \quad (1)$$

logrando eliminar el llamado efecto de la fuente y así obtener las frecuencias naturales de la cuenca. Debido a la dificultad para obtener los espectros en el basamento rocoso, Nakamura propuso utilizar

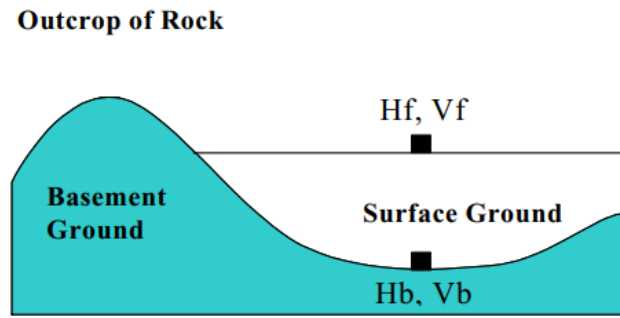


Figura 2. Modelo asumido por Nakamura para interpretar las mediciones de un microsismo, donde H_f y V_f son las transformadas de Fourier del movimiento horizontal y vertical en la superficie, respectivamente, y H_b y V_b son los espectros en el basamento rocoso. Adaptado de Nakamura (1989).

una función de transferencia $T_h^*(\omega)$, siendo su expresión:

$$T_h^*(\omega) = \frac{T_h(\omega)}{T_v(\omega)} = \frac{H_f(\omega)}{V_f(\omega)} \times \frac{1}{\frac{H_b(\omega)}{V_b(\omega)}}. \quad (2)$$

Nakamura (1989) determinó experimentalmente utilizando registros de microtremors obtenidos en un pozo, que $H_b(\omega)/V_b(\omega) \approx 1$, de esta manera la función de transferencia $T_h^*(\omega)$ se define según:

$$T_h^*(\omega) = \frac{H_f(\omega)}{V_f(\omega)} = H/V. \quad (3)$$

Puede demostrarse tanto teórica como empíricamente que la relación entre $H_f(\omega)$ y $V_f(\omega)$ presenta un pico en concordancia con la frecuencia de resonancia fundamental (f_0) del suelo (Ritta et al. 2012).

DATOS

El presente estudio se realizó mediante la adquisición de datos de ruido sísmico en 45 estaciones sismológicas pertenecientes a las redes XC, BR y BL ubicadas en el noreste de Argentina, Uruguay, Paraguay, Brasil y Bolivia (Figura 3). Las tres redes pertenecen a la Rede Sismográfica Brasileira (RSBR) y los datos son obtenidos a través del Centro de Sismología de la Universidad de São Paulo (<http://moho.iag.usp.br>), que es la institución responsable de la adquisición, mantenimiento y divulgación de estos. En particular, las estaciones XC (restringidas) fueron instaladas a través del proyecto Pantanal-Chaco-Paraná Basins (PCPB) *Crust and Upper Mantle Seismic Structure and Evolution* (Proyecto Tres Cuencas), acreditado por el FAPESP (*Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo*) Research Program.

Para realizar el análisis elegimos arbitrariamente datos correspondientes a 13 días a lo largo del año 2017 y del 2018, teniendo en cuenta la disponibilidad de registros para esos días en todas las estaciones, particularmente de la red XC, instalada entre 2016 y 2017. La elección de los días se hizo considerando diferentes situaciones climáticas en el área de estudio. Sin embargo, no se dispone de datos para algunos días en ciertas estaciones.

La adquisición de los datos se realizó con sismómetros Trillium 120Q y STS-2.5, de tres componentes, con una frecuencia de muestreo de 100 Hz.

La estación ARAP de la red XC instalada en 2017 se desplazó unos pocos kilómetros (10 km) en 2018, cambiando su denominación a PSAL. Teniendo en cuenta la dimensión del área de estudio, para el análisis se considerarán ambos registros conjuntamente; sin embargo, esta situación se tendrá en cuenta a la hora de interpretar los resultados.

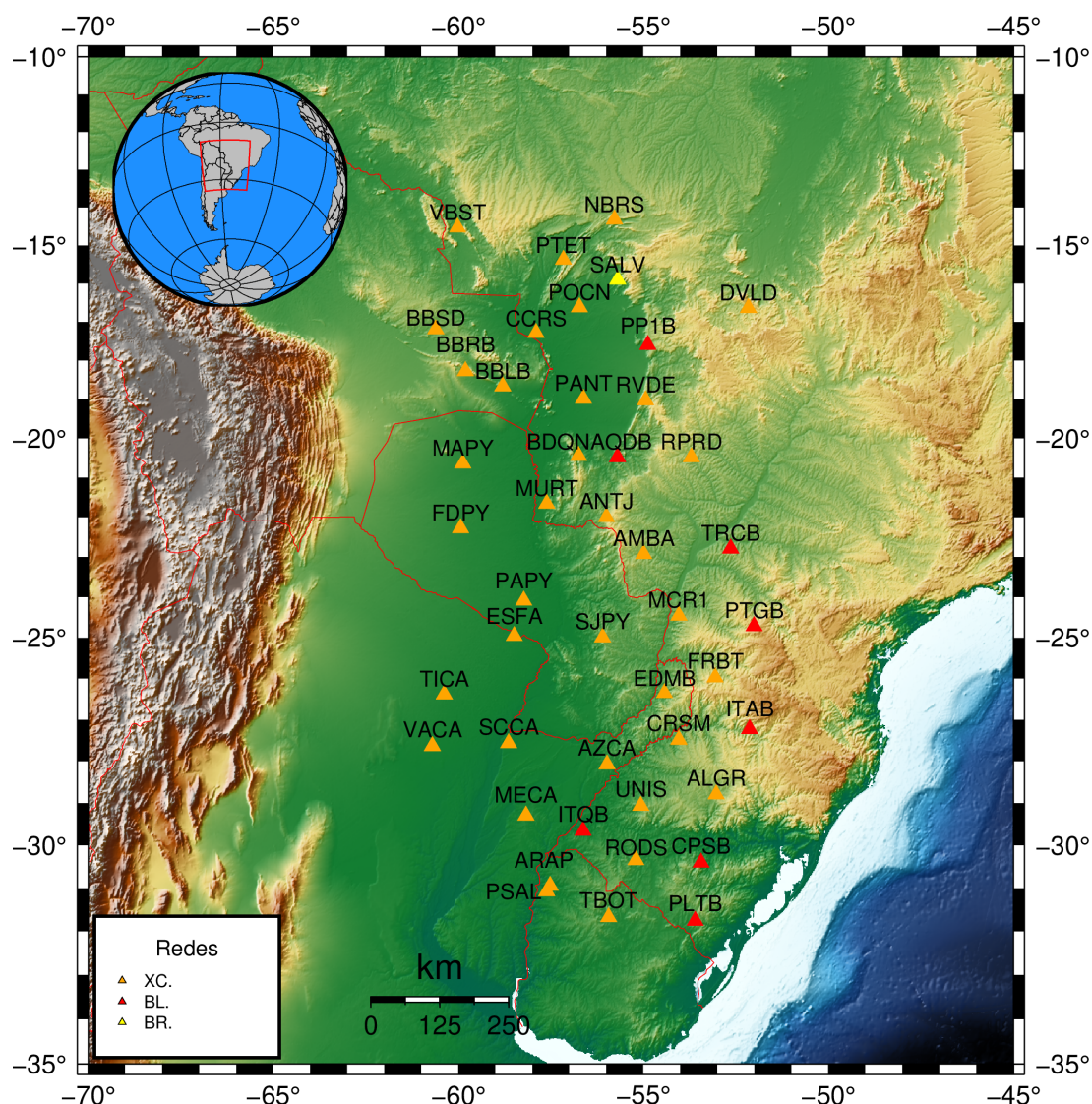


Figura 3. Estaciones sismológicas localizadas en la región de estudio.

PROCESAMIENTO

Realizamos el procesamiento de los datos siguiendo las pautas y recomendaciones del proyecto SESAME (*Site Effect Assessment using Ambient Excitations*) (Marcellini, 2006), usando el software libre Geopsy 3.4.2 (*GEOPhysical Signal database for noise array processing*) (<https://www.geopsy.org>) (Wathelet et al. 2020). Este software realiza un análisis estadístico del campo de ondas registrado en el dominio de la frecuencia, calculando los espectros de amplitud de las tres componentes en ventanas de tiempo cuya longitud depende de la banda de frecuencia de interés.

Analizamos registros de ruido ambiente divididos en cuatro franjas de una hora: 05–06 TU, 11–12 TU, 16–17 TU y 22–23 TU, con el fin de considerar momentos calmos y perturbados a lo largo del día, y así relacionarlos con posibles variaciones en el comportamiento de las curvas. En cada franja horaria se analizaron ventanas de 20 s. Para evitar los ruidos transitorios, aplicamos el algoritmo STA/LTA con valores de 1 s para STA, 30 s para LTA y, para la relación STA/LTA, un mínimo de 0.2 y un máximo de 2.5, valores típicos sugeridos por Marcellini (2006), para evitar ventanas con amplitudes anómalamente bajas. Realizamos un suavizado en ambos extremos de las ventanas para evitar discontinuidades abruptas que puedan distorsionar el espectro de Fourier, afectando particularmente los picos (Chatelain y Guillier, 2013). Luego aplicamos una función de suavizado espectral en las tres componentes (Konno y Ohmachi, 1998), con una constante de suavizado de 40 que corresponde a un ancho de 20 %, con el fin de facilitar la identificación del pico f_0 , y obtuvimos el espectro horizontal

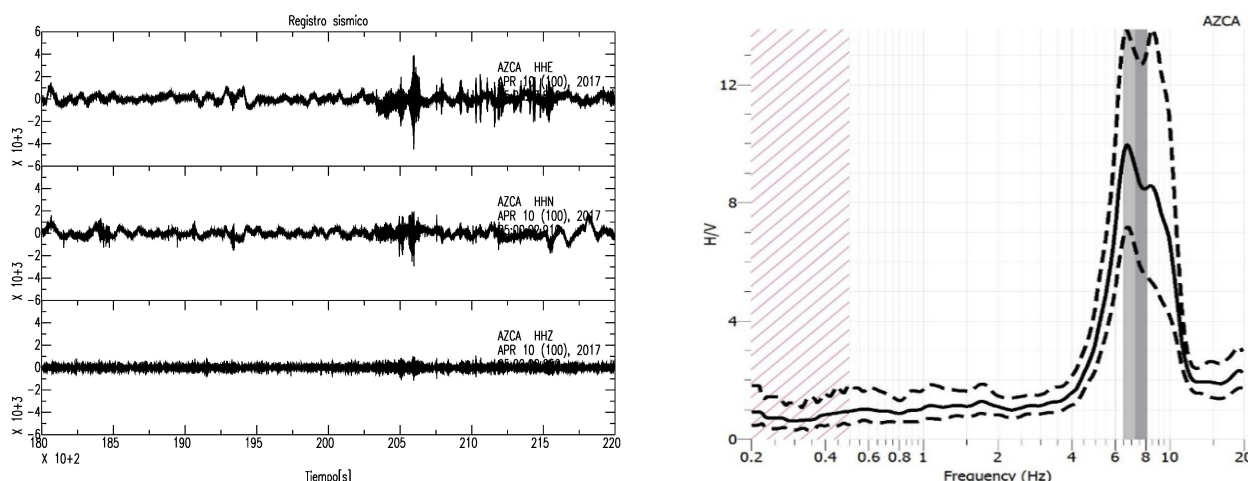


Figura 4. Registro de tres componentes de la estación sismológica AZCA (izquierda) y su curva H/V correspondiente a la franja horaria 05–06 TU (derecha). Curva H/V promedio (línea negra), curva de desviación estándar (líneas punteadas) y desviación estándar de la frecuencia fundamental (área gris vertical).

utilizando la media geométrica. Finalmente, determinamos las curvas promedio H/V.

RESULTADOS

Analizamos los registros de ruido ambiental para cada estación, en los días y franjas horarias mencionadas anteriormente, obteniendo las 52 curvas promedio H/V con sus respectivas curvas de desviación estándar (Figura 4), donde se identifica la frecuencia de resonancia fundamental (f_0) del sitio. Luego aplicamos el software libre HVTEST 1.0.6 (<https://github.com/theking0/HVTEST.git>), para considerar las pautas de SESAME (Marcellini, 2006), fundamentalmente criterios de confiabilidad y claridad del pico H/V.

Considerando que los picos de frecuencia pueden ser debidos tanto a origen natural como antrópico, para realizar una mejor interpretación se identificaron los picos industriales siguiendo las sugerencias brindadas por SESAME: presencia de picos agudos en los espectros de amplitud de las tres componentes (E, N, Z) y valores de amortiguamiento menores al 5 %. Este último valor se obtiene aplicando la técnica de *Random Decrement*.

Para algunas estaciones, los resultados no fueron satisfactorios y no se pudieron obtener curvas que cumplieran los criterios objetivo. Por lo que decidimos examinar los datos en cada estación de forma individual, variando las franjas horarias seleccionadas (dentro de las ventanas horarias de mañana, mediodía, tarde y noche), la longitud de ventana (valores de hasta 120 s en algunos casos) y la aplicación del algoritmo STA/LTA. En cuanto al resto de los parámetros, si bien se variaron, no hubo modificaciones. Con este último enfoque conseguimos curvas H/V para 21 estaciones que cumplen los criterios de confiabilidad y claridad (Tabla 1), mientras que para las 24 estaciones restantes obtuvimos curvas planas (sin picos distinguibles).

DISCUSIÓN

Determinamos la relación espectral H/V de registros de ruido ambiental en 45 estaciones sismológicas ubicadas en las cuencas sedimentarias Paraná, Chaco-Paraná y Pantanal (Figura 3). Según Lachet y Bard (1994), se requiere un fuerte contraste de impedancia sismo-acústica (> 2) entre estratos para que se genere un pico en la curva H/V. El primer pico (o frecuencia mínima) representa la frecuencia fundamental del suelo y está relacionada con el contraste de impedancia entre un estrato sedimentario y el basamento. Por otro lado, las curvas H/V planas que se acercan a amplitudes de la unidad, sostenidas en un gran rango de frecuencias, pueden indicar la existencia de un suelo duro o

Tabla 1. Detalle por estación de la cantidad de picos presentes, las frecuencias y sus orígenes. En la última columna se detalla la relación entre el número de curvas que cumplen los criterios sobre un total de 52 curvas por estación.

#	Estación	Cant. de picos	Frecuencia [Hz]	Origen	Criterios
1	AZCA	1	7.20	Natural	52/52
2	BBLB	1	4.81	Natural	52/52
3	BDQN	1	8.02	Industrial	52/52
4	DVLD	1	10.78	Natural	52/52
5	EDMB	1	16.96	Industrial	48/48
6	FDPY	2	0.11/0.43	Natural	44/52
7	ESFA	3	0.21/0.60/0.93	Natural	52/52
8	ITQB	1	33.29	Industrial	52/52
9	MAPY	1	0.57	Natural	52/52
10	PANT	2	0.36/1.02	Natural	52/52
11	PAPY	2	0.15/0.64	Natural	40/52
12	PLTB	1	12.06	Industrial	36/52
13	POCN-Grupo1	2	0.33/1.08	Natural	40/52
13	POCN-Grupo2	1	31.53	No concluyente	40/52
14	PTET	1	5.00	Natural	52/52
15	RODS	1	0.32	Natural	52/52
16	RPRD	1	3.75	No concluyente	52/52
17	SCCA	1	0.27	Natural	48/52
18	TBOT	1	0.67	Natural	52/52
19	TICA	2	0.21/0.62	Natural	40/52
20	TRCB	1	1.15	Natural	52/52
21	VBST	1	3.24	Natural	52/52

basamento (Kamarudin et al. 2015).

Nuestros resultados muestran para 24 estaciones curvas planas, sin picos destacados, indicando una falta de contraste de impedancia debido a que la estación estaría instalada sobre basamento o roca muy firme que no revela discordancia alguna de velocidad en profundidad, por lo que la transición entre capas no es brusca y las ondas no se reflejan con suficiente energía. También podría ocurrir que, si el espesor del sedimento es muy grande o pequeño respecto a las longitudes de onda del ruido sísmico registrado, no se produciría una resonancia dentro del rango de frecuencias analizado. Estas curvas planas fueron obtenidas fundamentalmente en la mayoría de las estaciones que se encuentran en la cuenca Paraná, de gran espesor sedimentario. Para estudios posteriores se recomienda integrar las mediciones H/V con campañas puntuales de GPR y sísmica activa. La combinación de métodos permitirá superar ambigüedades espesor-velocidad, reducir incertidumbres y mejorar la caracterización de contrastes de impedancia.

Para las 21 estaciones restantes, las curvas presentan picos claros (Tabla 1). En cuatro estaciones (PLTB, ITQB, EDMB, BDQN) esos picos son de origen industrial, por lo que no se puede inferir sobre las frecuencias naturales de esos sitios. En una estación (RPRD) no se pudo determinar si el origen del pico es industrial o natural, por lo que los resultados son no concluyentes. En estos casos SESAME no recomienda su clasificación. En la estación POCN las curvas muestran un comportamiento singular, ya que presentan dos picos de frecuencias que difieren en un orden de magnitud (0.3 y 30 Hz). Para el pico de alta frecuencia, no se pudo determinar su origen (no concluyente) por lo que no se clasifica, mientras que el pico de baja frecuencia es de origen natural. En las restantes 15 curvas observamos picos con valores entre 0.11 Hz y 10.78 Hz, que representan la frecuencia de resonancia del sitio, mostrando el contraste de impedancia sísmica entre los sedimentos y el basamento rígido.

Analizando en particular los picos de origen natural, en diez estaciones las curvas mostraron un solo pico por curva, en cinco estaciones se observaron dos picos claros, uno a bajas frecuencias

Tabla 2. Clasificación de tipos de suelo por estación. Las estaciones marcadas con superíndice * presentan picos de origen industrial y las marcadas con ** indican resultados no concluyentes. Las estaciones instaladas sobre basamento presentan curvas planas, por lo que no se pudo determinar el período T_0 .

#	Estación	T_0	Clasificación	#	Estación	T_0	Clasificación
1	ALGR	—	Basamento	24	MURT	—	Basamento
2	AMBA	—	Basamento	25	NBRS	—	Basamento
3	ANTJ	—	Basamento	26	PANT	2.78	Roca ext. blanda
4	AQDB	—	Basamento	27	PAPY	6.67	Roca ext. blanda
5	ARAP	—	Basamento	*28	PLTB	—	No clasificado
6	AZCA	0.14	Roca	29	POCN-G1	3.03	Roca ext. blanda
7	BBLB	0.21	Roca erosionada	**29	POCN-G2	—	No clasificado
8	BBRB	—	Basamento	30	PP1B	—	Basamento
9	BBSD	—	Basamento	31	PSAL	—	Basamento
*10	BDQN	—	No clasificado	32	PTET	0.20	Roca erosionada
11	CCRS	—	Basamento	33	PTGB	—	Basamento
12	CPSB	—	Basamento	34	RODS	3.15	Roca ext. blanda
13	CRSM	—	Basamento	**35	RPRD	—	No clasificado
14	DVLD	0.09	Roca dura	36	RVDE	—	Basamento
*15	EDMB	—	No clasificado	37	SALV	—	Basamento
16	ESFA	4.76	Roca ext. blanda	38	SCCA	3.70	Roca ext. blanda
17	FDPY	9.09	Roca ext. blanda	39	SJPY	—	Basamento
18	FRBT	—	Basamento	40	TBOT	1.49	Roca bast. blanda
19	ITAB	—	Basamento	41	TICA	4.76	Roca ext. blanda
*20	ITQB	—	No clasificado	42	TRCB	0.87	Roca blanda
21	MAPY	1.75	Roca ext. blanda	43	UNIS	—	Basamento
22	MCR1	—	Basamento	44	VACA	—	Basamento
23	MECA	—	Basamento	45	VBST	0.31	Roca eros./blanda

(< 0.4 Hz) y el otro cercano a 1 Hz, y en una estación (ESFA) se encontraron tres picos de frecuencias menores a 1 Hz. Estos resultados indican la existencia de un segundo contraste acústico significativo entre dos capas superficiales, causando esa segunda resonancia del suelo; y utilizando el mismo criterio se podría explicar incluso la existencia del tercer pico (Macau et al. 2015). Las frecuencias de resonancia más altas están relacionadas con un contraste de impedancia a menor profundidad, causado por una capa superficial, que puede comportarse independientemente de toda la columna de suelo. Datos geológicos y geofísicos, por ejemplo, perforaciones con descripciones litológicas o perfiles de velocidad de ondas de corte, resultan esenciales para explicar mejor la presencia de estos picos (Macau et al. 2015).

Siguiendo los trabajos de Shinoda et al. (2009) y Rodríguez-Marek et al. (2009), determinamos el tipo de suelo debajo de cada estación sísmológica (Tabla 2), a partir de la frecuencia de resonancia (f_0) del sitio o su inversa, el período (T_0).

El mapa de la Figura 5 muestra la distribución de frecuencias de resonancia (f_0) por estación. Las frecuencias bajas (< 1 Hz) concuerdan con la ubicación de las cuencas de la región. Las estaciones ubicadas sobre la región de mayor espesor sedimentario de cada cuenca presentan frecuencias f_0 muy bajas, las cuales están relacionadas con contrastes de impedancia profundos que nos indican el contacto entre el basamento y la cuenca sedimentaria propiamente. En cuanto al tipo de suelo, estos se clasifican como suelos extremadamente blandos; este es el caso de las estaciones SCCA, TICA, ESFA, PAPY, FDPY y MAPY, las cuales se encuentran distribuidas sobre la cuenca Chaco-Paraná. Observamos una situación similar para las estaciones PANT y POCN, que se encuentran localizadas sobre el eje central de la cuenca Pantanal y se relacionan con un suelo extremadamente blando. Para la cuenca Paraná se observa el mismo comportamiento en varias estaciones, presentando f_0 bajas en la región de mayor espesor sedimentario, pero mostrando una variabilidad en cuanto a los tipos de suelo que generaron esas frecuencias. La estación RODS se encuentra sobre un suelo

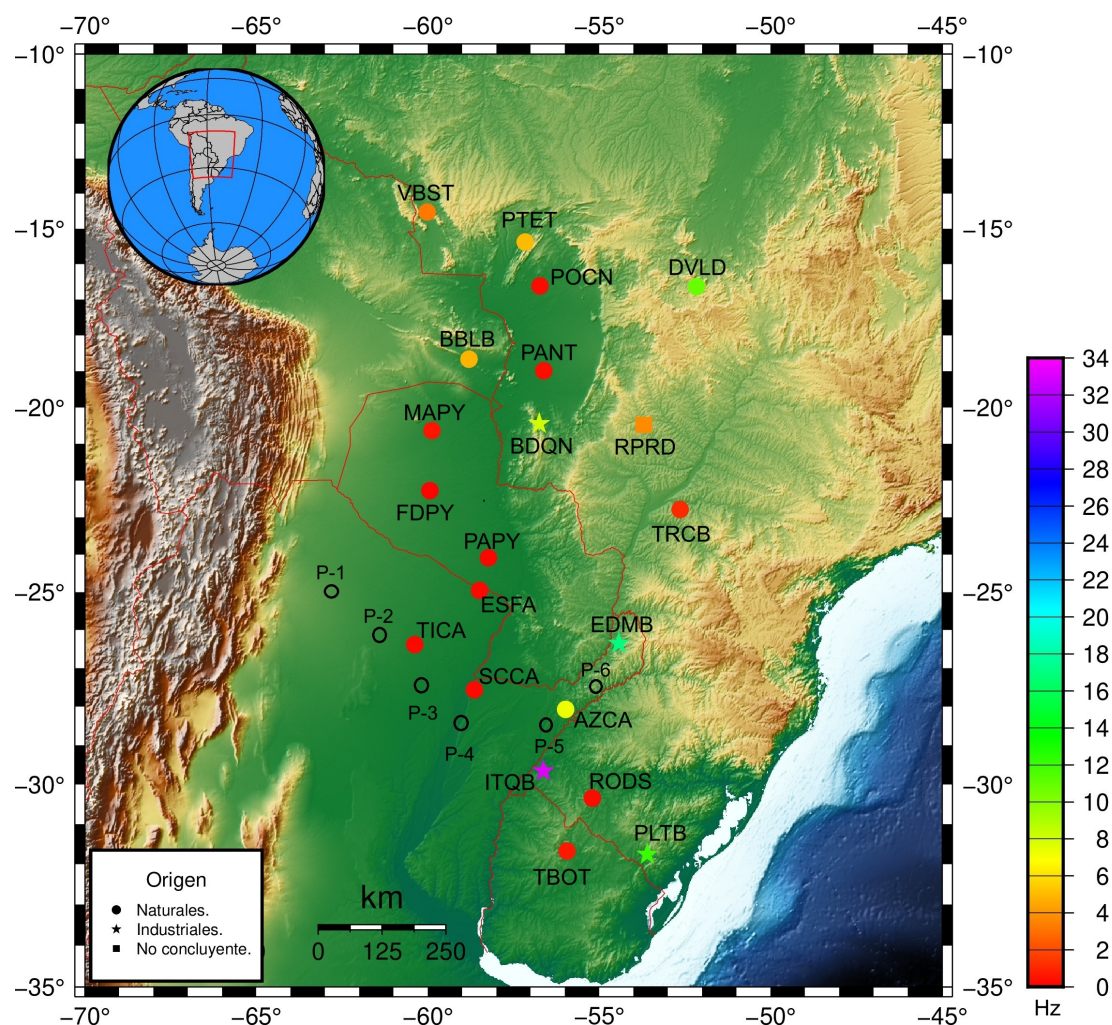


Figura 5. Mapa que muestra los valores de frecuencias [Hz] obtenidas por estación. Los círculos de colores representan los picos de origen natural, las estrellas corresponden a los industriales y los cuadrados los casos no concluyentes. Se indica la ubicación de pozos de perforación (P-1 a P-6) mediante círculos negros. Extraído de Torra (2005).

extremadamente blando, mientras que TBOT y TRCB están sobre suelos blandos.

Las estaciones que presentaron picos con frecuencias altas (> 1 Hz) se encuentran localizadas en los bordes o márgenes de cuenca, como es el caso de las estaciones BBLB, PTET y VBST, que están ubicadas en el extremo oeste de la cuenca Pantanal y se encuentran en suelo erosionado o roca firme. La estación DVLD, instalada en el extremo norte de la cuenca Paraná, posee el mayor valor de frecuencia, $f_0 = 10.77$ Hz, indicando así que se encuentra sobre un suelo firme. Un contexto semejante observamos para la estación AZCA, localizada en la transición entre las cuencas Paraná y Chaco-Paraná, donde el espesor sedimentario es mínimo y presenta un pico de frecuencia f_0 alto relacionado con un suelo firme.

Los valores y la distribución de los segundos picos responden a una geología donde existe un contraste de impedancia más bien superficial, como se indicó anteriormente. Comparamos la curva H/V obtenida en la estación TICA con la información obtenida del pozo de perforación P-2 J.J. Castelli (Figuras 5 y 6), donde se observa la presencia de lavas del Jurásico superior–Cretácico medio a 550 m de profundidad, las cuales creemos que están generando el segundo pico de 0.62 Hz. Este análisis lo podemos extrapolar para las estaciones ESFA y PAPY, ya que no contamos con información de pozo en esa zona, pero en sus curvas H/V los segundos picos toman valores similares, de 0.60 Hz y 0.64 Hz, respectivamente, lo cual nos hace pensar que estarían respondiendo al mismo fenómeno.

Por otro lado, para las estaciones POCN y PANT, localizadas en la cuenca Pantanal, podemos

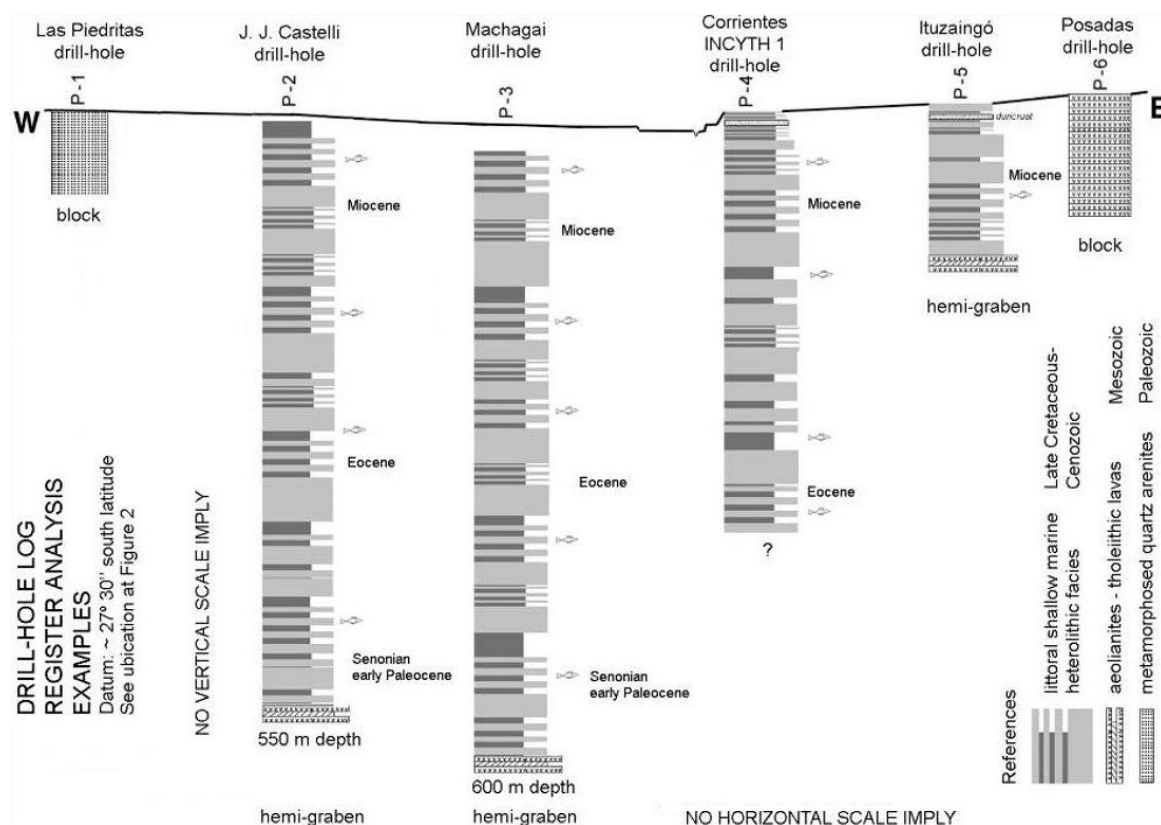


Figura 6. Esquema que muestra la correlación entre los registros de pozo en la cuenca Chaco-Paraná. Extraído de Torra (2005).

relacionar los dos segundos picos de 1.08 Hz y 1.02 Hz, respectivamente, con los resultados obtenidos por Taioli et al. (2021). Estos autores utilizaron la metodología GPR (*Ground Penetrating Radar*), con la cual determinaron la existencia de dos discontinuidades que separaban tres secuencias deposicionales, donde la más joven data de fines del Pleistoceno y Holoceno, seguida de dos depósitos más antiguos vinculados con canales de migración lateral y depósitos en forma de barra. Con estos resultados podemos sugerir que estos dos picos también están respondiendo a la misma secuencia deposicional, siendo la discontinuidad superior la posible causante.

Los resultados obtenidos para estas tres cuencas, ubicadas en una región de baja sismicidad, constituyen una herramienta fundamental para comprender la dinámica de estas. A partir del análisis de ruido sísmico, pudimos identificar la frecuencia fundamental de resonancia y relacionarla con los tipos de suelo bajo las estaciones. De este modo, el método H/V ofrece una vía confiable para estimar la respuesta sísmica local y los fenómenos de amplificación en zonas sin registros sísmicos significativos. Su simplicidad operativa, bajo requerimiento logístico y sensibilidad a los contrastes de impedancia lo convierten en un recurso eficaz para la caracterización dinámica de cuencas sedimentarias donde la exploración activa es difícil o costosa.

CONCLUSIONES

En este trabajo determinamos la relación espectral entre las amplitudes horizontal y vertical de registros de ruido sísmico de 45 estaciones sismológicas de la red BRASIS, utilizando la técnica de Nakamura (1989) para el cálculo de las curvas H/V, con el fin de caracterizar las cuencas sedimentarias Paraná, Chaco-Paraná y Pantanal. Este método es sencillo en cuanto a la recolección de datos y a su implementación en áreas de sismicidad moderada a baja, proporcionando información rápida sobre las características dinámicas del suelo y de las estructuras presentes.

Para 24 estaciones se obtuvieron curvas planas sin presencia de picos destacados, con valores de

amplitud menores a 2. Esta respuesta indica una falta de contraste de impedancia debido a que las estaciones estarían instaladas sobre basamento o roca firme. Para las 21 estaciones restantes, las curvas H/V calculadas presentaron uno o más picos con valores de frecuencias fundamentales entre 0.1–10 Hz, que permitieron analizar e inferir acerca de su origen. En cuatro de esas 21 estaciones se determinó que los picos eran de origen antrópico, originados quizás por actividad industrial que podría encontrarse en cercanía de las estaciones; y para dos estaciones las curvas presentaron resultados no concluyentes, ya que no se pudo determinar si el origen del pico de frecuencia es industrial o natural. Las restantes curvas mostraron picos de origen puramente natural, correspondientes a la frecuencia de resonancia del sitio.

Las estaciones ubicadas en los márgenes de cuenca presentan frecuencias fundamentales altas (> 1 Hz), correlacionadas con suelos firmes o roca/basamento, mientras que las estaciones ubicadas hacia el centro de las cuencas presentan frecuencias muy bajas que se vinculan con suelos blandos o muy blandos, las cuales están relacionadas con contrastes de impedancia profundos que nos indican el contacto entre el basamento y la cuenca sedimentaria propiamente. Las curvas H/V inferidas para algunas estaciones localizadas sobre las cuencas Chaco-Paraná y Pantanal muestran similitud entre ellas, presentando dos picos de frecuencia: el de menor frecuencia, indicativo de la presencia de suelo blando, y el de mayor frecuencia, que podría deberse a un contraste entre dos capas más superficiales de sedimentos.

Estos comportamientos reflejan la relación inversa entre frecuencia, espesor y velocidad de corte (V_s), y tienen implicancias importantes en la evaluación del riesgo sísmico y la caracterización geotécnica del subsuelo. Este estudio ha permitido analizar efectos de sitio utilizando una técnica amigable con el medio ambiente, pues trabajamos con ruido ambiental, y gracias a esto se puede aplicar en zonas urbanas. La metodología es de bajo costo, ya que se pueden utilizar estaciones previamente instaladas, en las cuales se tenga accesibilidad a sus datos. Por su parte, la obtención de datos y el procesamiento de las curvas H/V pueden realizarse de forma remota, sin necesidad de trasladarnos a la zona de estudio. Su aplicación, no invasiva, representa una alternativa eficiente para apoyar la planificación urbana y la gestión del riesgo geotécnico en ciudades asentadas sobre depósitos aluviales extensos.

REFERENCIAS

- Assine, M. L. y Soares, P. C. (2004). Quaternary of the Pantanal, west-central Brazil. *Quaternary International*, 114(1), 23-34. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(03)00039-9)
- Chatelain, J. L. y Guillier, B. (2013). Reliable fundamental frequencies of soils and buildings down to 0.1 Hz obtained from ambient vibration recordings with a 4.5 Hz sensor. *Seismological Research Letters*, 84(2), 199-209. <https://doi.org/10.1785/0220120003>
- da Silveira, A. L. A., Amorim, G. M. e., Pessi, D. D., da Silva, N. M., Mito, C. L., Rodrigues, A. G. S., Pedrozo Júnior, V. R., Paranhos Filho, A. C. y Machado, R. (2021). Evaluation of the depth of the Pantanal sedimentary basin based on seismic events. *Research, Society and Development*, 10(9), e57710918243. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i9.18243>
- Kamarudin, A. F., Daud, M. E., Ibrahim, Z. y Ibrahim, A. (2015). Part 2: case studies – evaluation of site fundamental frequency and ground characterization on rock and sedimentary sites using HVRS method. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(81), 72-76.
- Kanai, K. y Tanaka, T. (1961). On microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 39, 97-114.
- Konno, K. y Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), 228-241. <https://doi.org/10.1785/bssa0880010228>
- Lachet, C. y Bard, P. Y. (1994). Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *Journal of Physics of the Earth*, 42(5), 377-397. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.42.377>
- Macau, A., Benjumea, B., Gabàs, A., Figueras, S. y Vilà, M. (2015). The effect of shallow quaternary deposits on the shape of the H/V spectral ratio. *Surveys in Geophysics*, 36(1), 185-208. <https://doi.org/10.1007/s10712-014-9305-z>
- Marcellini, A. (2006). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations* [informe técnico]. SESAME European Research Project.
- McNamara, D. E. y Boaz, R. I. (2019). Visualization of the seismic ambient noise spectrum. En N. Nakata, L. Gualtieri y A. Fichtner (Eds.), *Seismic ambient noise* (pp. 1-29). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108264808.003>

- Mucciarelli, M., Herak, M. y Cassidy, J. (2007). *Increasing seismic safety by combining engineering technologies and seismological data*. Springer.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research*, 30(1), 25-33.
- Nakamura, Y. (30 de enero al 4 de febrero de 2000). *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications* [ponencia]. The 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand.
- Nogoshi, M. y Igarashi, T. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2). *Journal of the Seismological Society of Japan*, 24, 26-40.
- Ritta, R. J., Suárez, L. E. y Pando, M. A. (2012). Determinación del período fundamental del suelo usando vibración ambiental y el cociente espectral horizontal/vertical. *Mecánica Computacional*, 31(8), 1399-1419.
- Rocha, M. P., Assumpção, M., Affonso, G. M. P. C., Azevedo, P. A. y Bianchi, M. (2019). Teleseismic P wave tomography beneath the Pantanal, Paraná, and Chaco-Paraná basins, SE South America: delimiting lithospheric blocks of the SW Gondwana assemblage. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(7), 7120-7137. <https://doi.org/10.1029/2018JB016807>
- Rodríguez-Marek, A., Bray, J. D. y Abrahamson, N. A. (2009). An empirical geotechnical seismic site response procedure. En M. Mucciarelli, M. Herak y J. Cassidy (Eds.), *Technologies and seismological data* (pp. 353-380). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9196-4_24
- Shinoda, M., Watanabe, K., Kojima, K. y Tateyama, M. (2009). Outline of performance-based design for railway earth structure in Japan. En T. Kokusho, H. Tsukamoto y B. Yoshida (Eds.), *Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering: From Case History to Practice* (pp. 137-148). CRC Press.
- Taioli, F., Dos Santos, M. G. M., Assine, M. L. y Mendes, D. (2021). How ground penetrating radar helps to understand the Nhecolândia lakes landscape in the Brazilian Pantanal wetland. *Brazilian Journal of Geology*, 51(2), 1-11. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120200021>
- Torra, R. (2005). The Chaco Paraná basin rift basin system. An approach to the tectonic-stratigraphical evolution from the late Cretaceous to Quaternary, South America. *Ciência e Natura*, 27(2), 25-64.
- Wathelet, M., Chatelain, J. L., Cornou, C., Di Giulio, G., Guillier, B., Ohrnberger, M. y Savvaidis, A. (2020). Geopsy: a user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1878-1889. <https://doi.org/10.1785/0220190360>