



La técnica del cociente espectral H/V como herramienta para la determinación de estructuras ciegas. Un caso de estudio en la ciudad de Mendoza, Argentina

H/V spectral ratio technique as a tool for detection of blind structures. A study case in Mendoza city, Argentina

Giolo, Emilce - Calderón, Francisco ✉ - Pagano, Sebastián - Vía Gatica, Sebastián - Frau, Carlos

Recibido: 13 de enero de 2019 • Aceptado: 01 de diciembre de 2019

Resumen

El mapeo de fallas, lineamientos y otras estructuras geológicas resulta de gran interés tanto en el campo de la geología como en la ingeniería. Es aceptado por la comunidad científica que la existencia de estructuras ciegas no siempre pueden ser identificadas mediante las técnicas usuales de análisis del terreno, y su análisis requiere del estudio a través de métodos de observación indirecta. En este trabajo se presenta la técnica del cociente espectral H/V aplicado a vibraciones ambientales (también llamados microtremores), las cuales son obtenidas con acelerómetros o sismómetros. Este método da como resultado la frecuencia (f) o periodo ($T= 1/f$) de vibración fundamental del sitio en que se realiza la medición de vibraciones. Con este parámetro es posible identificar o sospechar la presencia de estructuras sin expresión morfológica o indicios geológicos en superficie. Esta información de obtención expeditiva puede ayudar a direccionar estudios confirmatorios más específicos en superficie o en subsuelo. El trabajo describe la técnica y sus fundamentos a la vez que se presentan tres casos de estudio en las cercanías de la Ciudad de Mendoza. En los dos primeros casos se presentan mediciones en lineamientos perpendiculares a la traza de la falla de Divisadero y de la falla La Cal. El tercer caso reúne los resultados de mediciones realizadas en la ciudad de Mendoza y son presentados en forma de mapa. Los resultados muestran la variación de frecuencia o periodo a ambos lados de la traza de las fallas en los dos primeros casos y la existencia de una variación brusca de la frecuencia o periodo en la ciudad de Mendoza. Esta variación brusca indica una posible falla de rumbo NNE-SSO, que atraviesa la ciudad de Mendoza y que coincide en ambos extremos con reconocidas estructuras en el área, (el anticlinal Borbollón y la zona de fallas inferidas de la Puntilla). Se concluye que dada la sencillez y economía que presenta esta técnica puede ser de ayuda en investigaciones preliminares de campo.

Palabras Clave: Estructuras Ciegas, Cociente Espectral H/V, Auscultación del subsuelo.

CeReDeTeC, Facultad Regional Mendoza,
Universidad Tecnológica Nacional, Argentina
✉ francisco.calderon@frm.utn.edu.ar

Abstract

The mapping of faults, lineaments and other geological structures is of great interest both in the field of geology and engineering. It is accepted by the scientific community that the existence of blind structures cannot always be identified by the usual techniques of ground analysis, and their analysis requires study through indirect observation methods. This paper presents the technique of the spectral ratio H/V applied to environmental vibrations (also called microtremores), which are obtained with accelerometers or seismometers. This method results in the frequency (f) or period ($T = 1/f$) of fundamental vibration of the site where the vibration measurement is performed. With this parameter it is possible to identify or suspect the presence of structures without morphological expression or surface geological evidence. This expedited information can help direct more specific confirmatory studies on the surface or underground. The work describes the technique and its fundamentals, while presenting three case studies in the vicinity of the City of Mendoza. In the first two cases, measurements are presented perpendicular to the trace of the Divisadero fault and the La Cal fault. The third case brings together the results of measurements made in the city of Mendoza and are presented in the form of a map. The results show the variation of frequency or period on both sides of the trace of the faults in the first two cases and the existence of a sharp variation of the frequency or period in the city of Mendoza. This abrupt variation indicates a possible NNE-SSO fault, which crosses the city of Mendoza and coincides at both ends with recognized structures in the area, (the Borbollón anticline and the area of inferred faults of the Puntilla) and in some places it coincides with the Cacique Guaymallén channel. It is concluded that given the simplicity and economy of this technique, it can be helpful in preliminary field investigations.

Keywords: *Blind Structures, H/V spectral ratio, Subsoil exploration.*

INTRODUCCIÓN

La identificación de estructuras potenciales de actividad sísmica es una tarea primaria en la larga cadena de los estudios de riesgo sísmico. La auscultación a cielo abierto de estas estructuras es, sin duda, la técnica más segura y la que aporta datos más confiables.

La expresión estratigráfica de paleoterremotos puede variar desde el desplazamiento de estratos al desarrollo de evidencias secundarias como la presencia de diques clásticos y deformación de sedimentos poco consolidados. Tales evidencias pueden o no estar acompañadas de rasgos geomorfológicos o estructurales que permitan visualizar la zona de ruptura fácilmente. Las primeras investigaciones en la temática se concentraron en las evidencias geomorfológicas porque las exposiciones verticales del terreno en zonas de falla son poco comunes. En ausencia de tales exposiciones las investigaciones pueden realizarse desde distintos puntos de vista: 1) recolección de datos geomorfológicos que denoten deformaciones superficiales para el análisis paleosísmico, 2) perforaciones en zonas de deformación, 3) excavaciones artificiales o trincheras a través de las zonas de deformación y 4) recolección de datos geofísicos mediante el uso de diferentes técnicas que permitan analizar el subsuelo e identificar zonas de falla.

En muchos casos el desarrollo de los centros poblados o bien la presencia de accidentes geográficos o topográficos hacen difícil, cuando no imposibles, auscultaciones a cielo abierto.

Los métodos geofísicos han demostrado ser una poderosa y exitosa herramienta para los estudios en paleosismología y han sido utilizados de tres maneras distintas: 1) como una técnica de reconocimiento para dilucidar la estratigrafía del subsuelo y la estructura de una zona de falla, en orden de optimizar y localizar los sitios para el desarrollo de trincheras o perforaciones; 2) para definir fallas que se expresan a profundidades mayores de las que pueden alcanzar una trinchera o perforación, y 3)

para detectar fallas ocultas que no tengan ningún tipo de expresión superficial (McCalping, 2009). Entre los métodos geofísicos más utilizados se reconocen las técnicas de sísmica de reflexión y refracción, georradar (GPR), métodos 2D de resistividad eléctrica y tomografía eléctrica vertical, magnetismo (aeromagnetismo) y gravimetría.

Los métodos sísmicos de reflexión y refracción han sido utilizados con gran éxito para detectar fallas y para caracterizar la estratigrafía del área de estudio, y si la misma es afectada o deformada por fallamientos. Sin embargo, la sísmica de reflexión es comparativamente más apropiada que el método de sísmica por refracción porque permite detectar de una manera más adecuada separaciones verticales asociadas con fallas (Crone and Harding, 1984).

El georradar (GPR) produce imágenes del subsuelo que se asemejan a las de sísmica de reflexión. Las similitudes surgen del uso común de ondas que se reflejan y luego son detectadas por un receptor en la superficie. En contraste con las ondas elásticas compresionales utilizadas en la reflexión sísmica (con frecuencias de hasta 100 Hz), el radar utiliza radiación electromagnética con frecuencias de 80 a 300 MHz. Esto produce que materiales con alta conductividad eléctrica como arcilla o fluidos con los sólidos disueltos altos disminuirán rápidamente la profundidad de penetración. Algunos estudios que han probado esta técnica de exploración superficial con fines ingenieriles incluyen a Hammond et al. (1986) y Kuo and Stangland (1989).

En los últimos años se ha notado un marcado incremento en el uso de métodos geoelectrónicos (perfiles geoelectrónicos 2D y tomografías eléctricas verticales) para la detección de fallas ocultas o como herramienta para localizar la estructura antes de llevar a cabo una trinchera (Caputo et al. 2003). Las tomografías eléctricas, por ejemplo, tienen varias ventajas en relación a otros métodos ya que no existe un límite en la profundidad de penetración. La presencia de salinidad o arcillas no interfieren en la profundidad de penetración como en el caso de GPR. Sin

embargo, una de las desventajas más importantes es la existencia de objetos metálicos en el suelo y el cableado eléctrico que puede inducir a falsas señales, algo frecuente en áreas urbanas.

Los métodos de geomagnetismo y gravimetría han provisto de un particular uso para entender la estructura del subsuelo, entre los métodos de prospección, los relevamientos electromagnéticos han sido utilizados para detectar fallamientos a gran escala, y en particular fallas de rumbo. Sin embargo, *Grauch (2001, 2002)* analizan una falla normal en el *Basin and Range province*, USA y demuestran que las anomalías magnéticas lineales son resultado del abrupto engrosamiento de los sedimentos sintectónicos (más grueso, más magnético) en el lado descendente de la falla. Muy escasos estudios han utilizado mediciones en terreno para la detección de fallas a pequeña escala (metros o decena de metros). *Bailey (1974)* detecta una zona de fallas con un magnetómetro en el área de California. Por otra parte, el relieve estructural resultante del desplazamiento de fallas de rumbo puede ser expresado como diferencias en la atracción gravitacional a través de una falla. No obstante, las fallas cercanas a la superficie, que afectan materiales pocos consolidados, pueden ser únicamente detectadas por datos de gravedad de estaciones muy cercanas. Esta aplicación muestra buenos resultados en un entorno óptimo con importantes contrastes de gravedad que involucren materiales de baja y alta densidad.

La técnica del cociente espectral H/V aplicado a vibraciones ambientales puede permitir identificar o sospechar la presencia de estructuras sin expresión morfológica o indicios geológicos en superficie. Esta información de obtención expeditiva puede ayudar a direccionar estudios confirmatorios más específicos en superficie o en subsuelo. La misma se basa en el concepto de función de transferencia entre componentes vibratorias horizontales y verticales. Esta técnica es ampliamente utilizada como método para la determinación de efectos de sitio en la ingeniería sísmica (*Calderón, et al. 2017*). La aplicación de este método se ha utilizado con éxito en la ciudad de Boumerdes en Argelia (*Hellel et al. 2012*) para la detección de una falla ciega, donde los resultados han sido corroborados con perforaciones y mediciones de velocidad de onda de corte. *Du et al. (2019)* utilizó este método en el área urbana de la ciudad China de Jinan, donde encontraron una zona de fractura ciega. *Gosar y Lenart (2010)* utilizaron las vibraciones ambientales para estimar el espesor de sedimentos en Ljubljana, Eslovenia y compararon los resultados con un perfil realizado con refracción sísmica, obteniendo una buena correlación.

En el presente trabajo se describe la técnica del cociente espectral H/V y sus fundamentos y se presentan dos casos de estudio de fallas sísmicas conocidas (la falla de La Cal y la falla de Divisadero Largo), en la provincia de Mendoza, Argentina, con fin de conocer las capacidades del método H/V en cuanto a capturar la presencia de fallas o estructuras sísmogénicas. El tercer caso, ubicado en la Ciudad de Mendoza, fue realizado por *Giolo et al. 2018*, donde se sugirió la posibilidad de la existencia de una falla ciega que atravesaría el área del Gran Mendoza. Esta técnica de rápida aplicación y muy bajo costo puede ser de ayuda en investigaciones preliminares de campo para identificar la posible presencia de estructuras ciegas.

MARCO GEOLÓGICO Y UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Mendoza se encuentra ubicada entorno a los 32° 53' 58'' de latitud S y 68° 51' 08'' de longitud O, a 770 m.s.n.m. en el frente orogénico activo de los Andes y sobre el

límite sur del actual segmento de subducción subhorizontal entre los 28° y 33° de latitud sur. El margen este de los Andes entre los 30° y 33°S, al sur del segmento de subducción subhorizontal de la placa de Nazca (Figura 1) es una de las zonas sísmicas más activas del mundo (*Costa et al. 2006, Moreiras et al. 2014*). El actual frente orogénico en las latitudes del área de estudio, donde se concentran la mayor cantidad de fuentes sísmogénicas del área, está confinado en el frente oriental de los Andes, al este de la Precordillera (*Bastías 1985, Cortés et al. 1999, Costa et al. 2000*). Esta área muestra una intensa actividad neotectónica evidenciada por fallas cuaternarias y actividad sísmica (*Costa et al. 2000*) asociada a terremotos intraplaca con menos de 30 km de profundidad. En el sentido estructural, el frente orogénico está compuesto por un sistema de fallas inversas paralelas con vergencia tanto al este como al oeste, que presentan evidencias geomorfológicas de desplazamientos cuaternarios (*Moreiras et al. 2014*). En el área de Mendoza, las fallas La Cal y Las Peñas son las estructuras tectónicamente con mayor importancia. Sin embargo, en las proximidades de Mendoza existen otras estructuras como las de El Cerro de la Gloria, El Cristo, Divisadero Largo, Melocotón y Agua de Las Avispas (Figura 1); hacia el sur este aparece el anticlinal Cruz de Piedra-Barrancas (*Nafá y Zamarbide 1989, Regairaz y Zambrano 1991, Perucca et al. 2009*).

METODOLOGÍA. MÉTODO DE COCIENTE ESPECTRAL H/V

El método del cociente espectral H/V consiste en la utilización de vibraciones ambientales de baja amplitud para la determinación de efectos de sitio a través del periodo fundamental T (o su inversa, la frecuencia fundamental $f = 1/T$) de la columna de suelo presente por encima del lecho rocoso. Se realiza mediante un cociente entre los Espectros Amplitudes de Fourier de las componentes horizontales y verticales de un registro de vibraciones ambientales en el sitio de estudio. El método se basa en las siguientes hipótesis. El efecto de la fuente se minimiza al realizar la división entre las amplitudes del espectro de vibraciones ambientales horizontales sobre las verticales. Se estima que las vibraciones ambientales contienen predominantemente ondas S, por lo que la relación espectral H/V es igual a la función de transferencia de dichas ondas entre la superficie y la base de la capa sedimentaria; así, el pico del espectro resultante es el correspondiente al periodo fundamental del sitio.

De esta manera, la excitación de la capa superficial provoca la amplificación del efecto de sitio producto de las ondas S. Por otro lado, las ondas Rayleigh que se propagan en las capas sedimentarias sobre lechos rocosos provocan el mismo efecto en las componentes horizontales y verticales del movimiento en la superficie. La metodología fue propuesta por *Nakamura (1989, 2000 y 2008)* y trata de eliminar el efecto que producen las ondas Rayleigh, de esa manera la función de transferencia queda determinada por ondas de cuerpo S.

Simplificadamente se plantea un modelo donde un suelo sedimentario está apoyado sobre un estrato rocoso donde la principal diferencia entre estos estratos es la velocidad de propagación de la onda S, lo cual implica que los movimientos se amplifican por el principio de conservación de la energía. Para el desarrollo del procedimiento, Nakamura plantea una serie de relaciones entre las amplitudes de los espectros de Fourier de las distintas componentes del movimiento tanto en superficie como en el lecho rocoso. Siendo H_b y V_b , las amplitudes espectrales

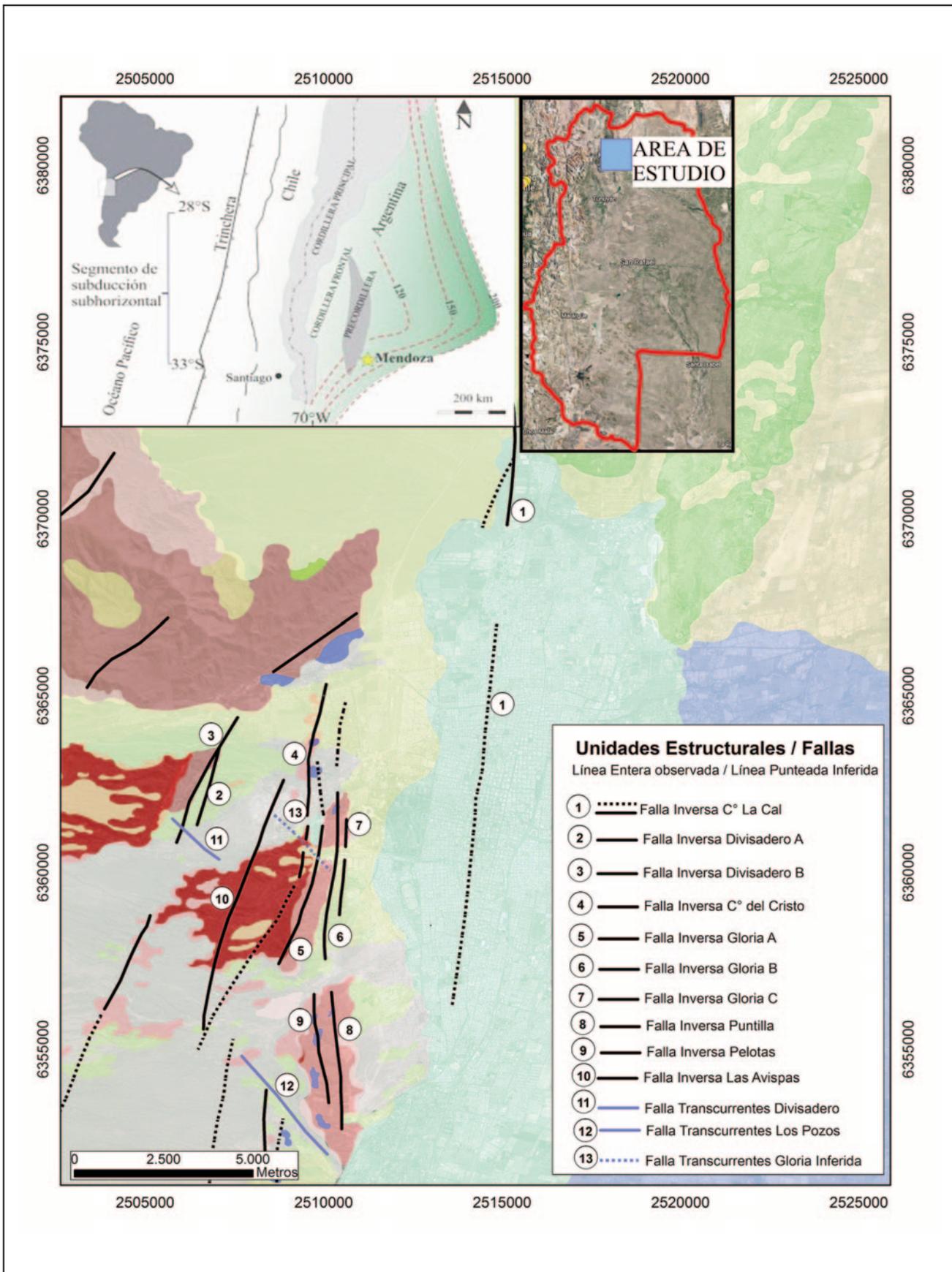


Figura 1. Mapa geológico estructural simplificado del área próxima a la ciudad de Mendoza, Piedemonte mendocino y Precordillera Austral.

del movimiento horizontal y vertical en el lecho rocoso respectivamente, y H_s y V_s las amplitudes espectrales de las componentes horizontal y vertical del movimiento en superficie.

La primera relación $A_s(\omega)$ es el efecto de las ondas Rayleigh, el cual se obtiene mediante:

$$A_s(\omega) = \frac{V_s(\omega)}{V_b(\omega)} \tag{1}$$

Cuando la relación $A_s(\omega)$ tiende a 1 (uno), es decir, que en todas sus ordenadas el espectro resultante es cercano a uno, el efecto de las ondas Rayleigh es nulo. Otra relación que plantea Nakamura es que la estimación del efecto de sitio, Se , se puede realizar mediante:

$$Se(\omega) = \frac{H_s(\omega)}{H_b(\omega)} \tag{2}$$

En este caso, si las $H_s(\omega)$ se ven afectadas por las ondas superficiales, se hace necesario remover el efecto de dichas ondas, por lo que se plantea la siguiente relación:

$$S_M(\omega) = \frac{Se(\omega)}{A_s(\omega)} = \frac{H_s(\omega)}{H_b(\omega)} \times \frac{V_b(\omega)}{V_s(\omega)} \tag{3}$$

Debido a que en el lecho rocoso se asume que la propagación de las ondas es la misma en todas las direcciones $H_b(\omega) = V_b(\omega)$ por lo que:

$$S_M(\omega) = \frac{H_s(\omega)}{V_s(\omega)} \tag{4}$$

De esta forma se puede estimar el efecto de sitio mediante $SM(\omega)$ conocida como Espectro de Cuasi Transferencia (QTS

en inglés). La Figura 2 muestra una función de transferencia teórica y el espectro resultante del método propuesto por Nakamura en la que puede observarse la buena correlación existente entre ambas.

Para el procesamiento y análisis de los datos se puede utilizar el software Geopsy, originado en el proyecto europeo SESAME (Site Effects assessment using Ambient Excitations). Esta herramienta "open source" (código abierto) permite visualizar, manipular y procesar señales geofísicas. Está diseñado principalmente para la sismología y prospección sísmica, pero también posee varios módulos para otras aplicaciones.

El primer paso en el procesamiento de los registros con esta herramienta es la selección de ventanas de tiempo. El objetivo de esta selección es remover las partes más transitorias de las vibraciones ambientales asociadas con fuentes específicas (transeúntes, tráfico, etc.). Se utiliza para este proceso un algoritmo anti-triggering o disparador, el cual detecta los transitorios y los elimina del procesamiento. Para ello se realiza una comparación entre el promedio de período corto (STA, Short Term Average) con valores típicos de 0,5 a 2 segundos y el promedio de período largo (LTA, Long Term Average).

El tiempo de cada ventana está en función de la frecuencia fundamental esperada en cada estudio y se debe satisfacer que la frecuencia fundamental del sitio f sea mayor que $10/lw$, donde lw es la longitud de ventana seleccionada. Para estimar el número de ventanas totales del registro necesario, asociado al número de ciclos completos requeridos para una correcta adquisición de la frecuencia fundamental, se utiliza la siguiente ecuación, donde nc es el número de ciclos y nw el número de ventanas. En base a las ecuaciones presentadas, la Tabla 1 contiene las longitudes de ventanas, número de ciclos significativos, número mínimo de ventanas y duración mínima del registro para diferentes frecuencias fundamentales.

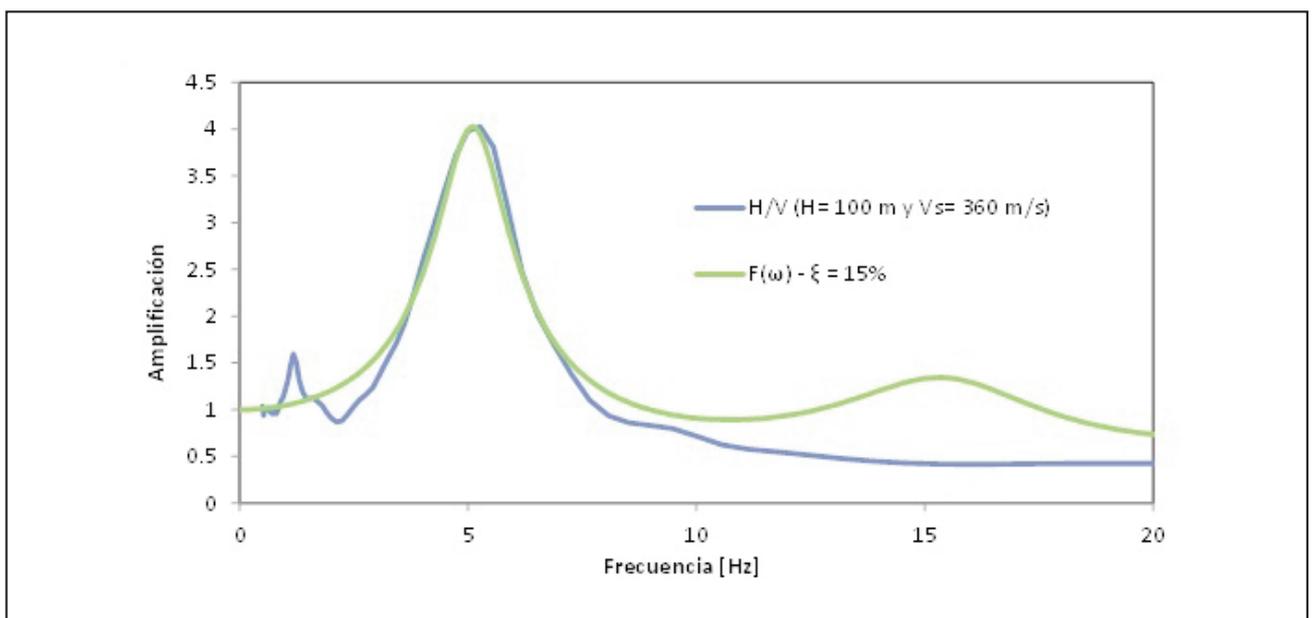


Figura 2. Función de transferencia teórica y el espectro resultante propuesto por Nakamura.

$$n_c = l_w \cdot n_w \cdot f > 200 \quad (5)$$

Para el presente estudio se configuró una longitud de ventana de 50s, un solape de ventanas de 50%, STA de 1.0s, LTA de 30s, una relación mínima de STL/LTA DE 0.20, una relación máxima de STA/LTA de 2.5, una constante de suavizado de 40 y un tapering de coseno del 5%. La Figura 3 muestra un registro típico de vibraciones ambientales. Una vez procesados los registros y obtenidos los resultados correspondientes se realiza una clasificación de acuerdo a cada pico aplicando los criterios de validación que especifica la guía del proyecto SESAME y se obtiene la frecuencia fundamental del sitio f o bien su período fundamental $T = 1/f$.

APLICACIÓN DEL MÉTODO

Como se mencionó, el método del cociente espectral H/V es utilizado para la determinación de periodo del suelo T . Dicho periodo está relacionado a dos parámetros fundamentales del

suelo, uno que representa su rigidez y está dado por la velocidad de la onda de corte V_s ; y el otro, la profundidad del estrato sedimentario hasta el lecho rocoso o gravas cementadas, que representa la potencia de la masa de suelo (ecuación 6). Por lo tanto, las variaciones de periodo en el suelo son indicativas de variación de alguno de estos dos parámetros, la profundidad de los estratos o la velocidad de onda de corte. Esta variación sugiere la presencia de ciertas anomalías o discontinuidades en el sub-suelo.

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (6)$$

Investigaciones recientes (Hellel *et. al.* 2012; Tebbouche *et. al.* 2017; Du *et al.* 2019; Gosar y Lenart 2010) han utilizado el método H/V como complemento en la investigación de fallamientos y profundidad de estratos hasta el lecho rocoso.

Tabla 1. Parámetros para mediciones y procesamiento de las señales.

| f [Hz] | l_w [s] | n_c | Mínimo número de ventanas | Mínima duración útil del registro [s] | Tiempo de muestreo recomendado [min] |
|--------|-----------|-------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 0.5 | 20 | 200 | 10 | 400 | 20' |
| 1 | 10 | 200 | 10 | 200 | 10' |
| 2 | 5 | 200 | 10 | 100 | 5' |
| 5 | 5 | 200 | 10 | 40 | 3' |
| 10 | 5 | 200 | 10 | 20 | 2' |

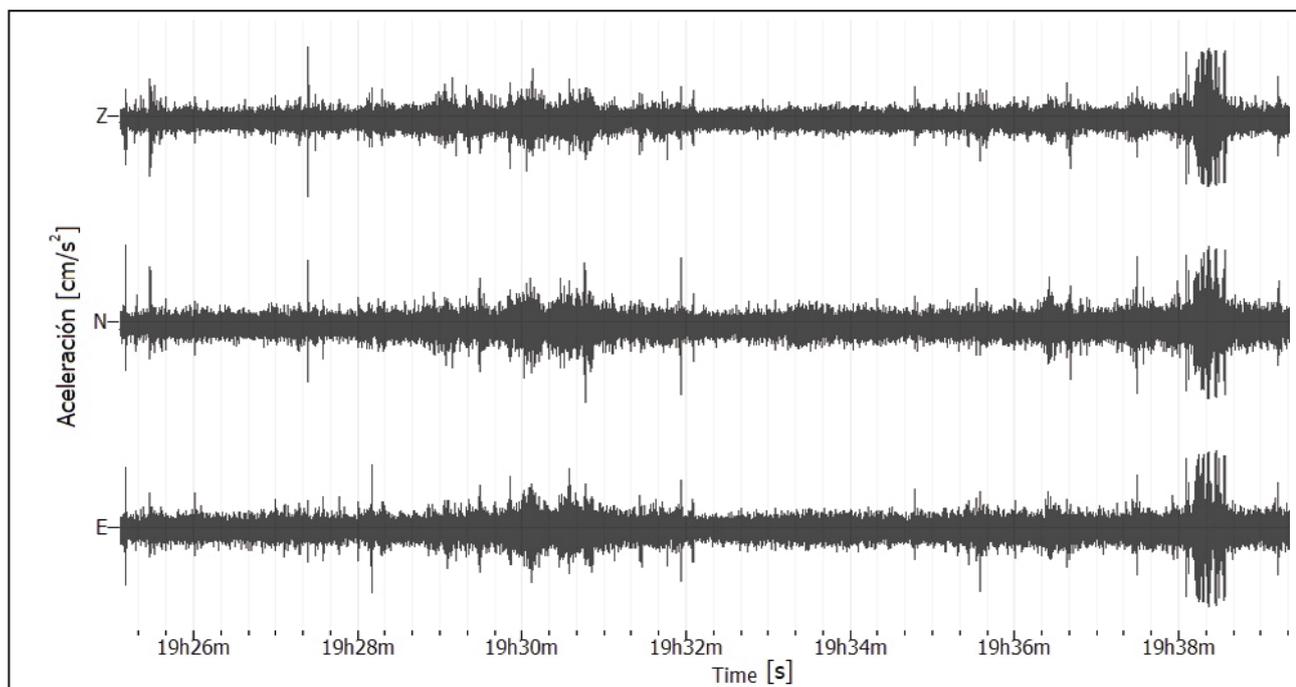


Figura 3. Registro típico de vibración ambiental con corrección de línea de base según sus tres componentes: vertical (Z) y los canales horizontales Norte-Sur (N) y Este-Oeste (E).

Hellel et al. (2012) realizaron estudios en la ciudad de Boumerdes, Argelia, donde se mapeó con la técnica del cociente espectral H/V los periodos fundamentales del suelo y se compararon resultados con otros estudios geofísicos a fin de conocer la profundidad del lecho de roca. Como resultado, los autores identificaron la presencia de una falla ciega debajo de la ciudad.

De aquí surgen dos características de este método con respecto a la identificación de fallas:

1. A lo largo de los perfiles, los cambios bruscos en los periodos del suelo se pueden usar para delinear características tectónicas como fallas.
2. La distribución espacial del periodo del suelo sobre un área es un buen indicador de la variación espacial relativa de la profundidad hasta la parte superior del basamento.

CASOS DE ESTUDIO

El primer sitio donde se aplicó la técnica H/V es la falla Divisadero Largo (Figura 5) al oeste de la ciudad de Mendoza, en la reserva natural del mismo nombre, el segundo sitio fue en la escarpa de la falla La Cal (Figura 4) al norte de la ciudad de Mendoza y el tercer sitio estudiado (Figura 6), no es una estructura conocida sino una zona de la ciudad de Mendoza donde se encontraron anomalías o marcadas variaciones en los periodos del suelo en el marco de estudios de zonificación sísmica (Giolo et al. 2018). En los dos primeros sitios se realizaron perfiles transversales a la traza de la falla y en el tercer caso se realizó una grilla a fin de poder confeccionar un mapa del parámetro estudiado en la ciudad de Mendoza.

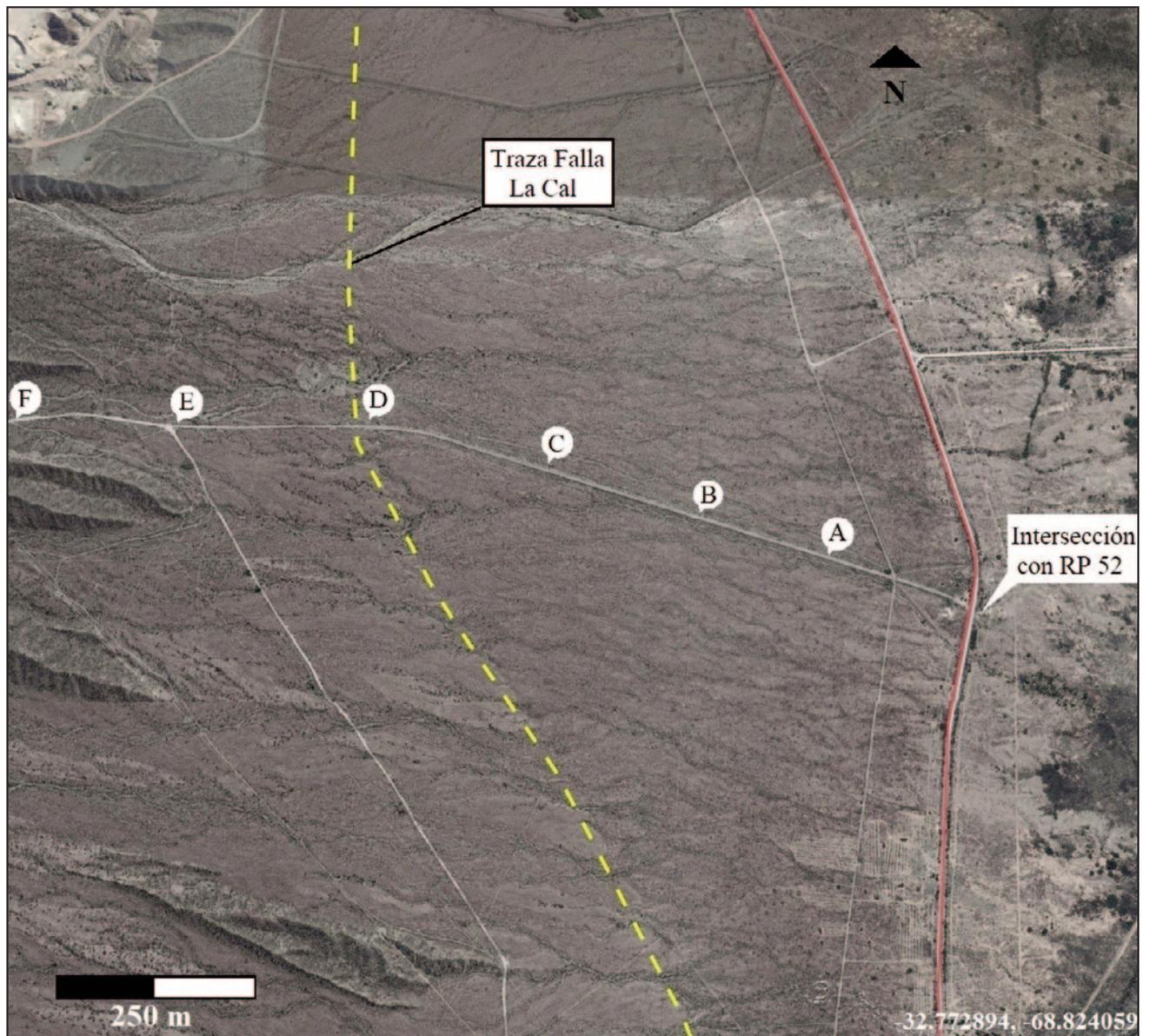


Figura 4. Posición de los puntos de medición de vibraciones ambientales. Los puntos se eligieron a fin de obtener un perfil aproximadamente perpendicular a la traza (línea amarilla) de la falla La Cal.



Figura 5. Posición de los puntos de medición de vibraciones ambientales (a lo largo de la línea roja). Los puntos se eligieron a fin de obtener un perfil aproximadamente perpendicular a la traza (línea amarilla) de la falla Divisadero Largo.

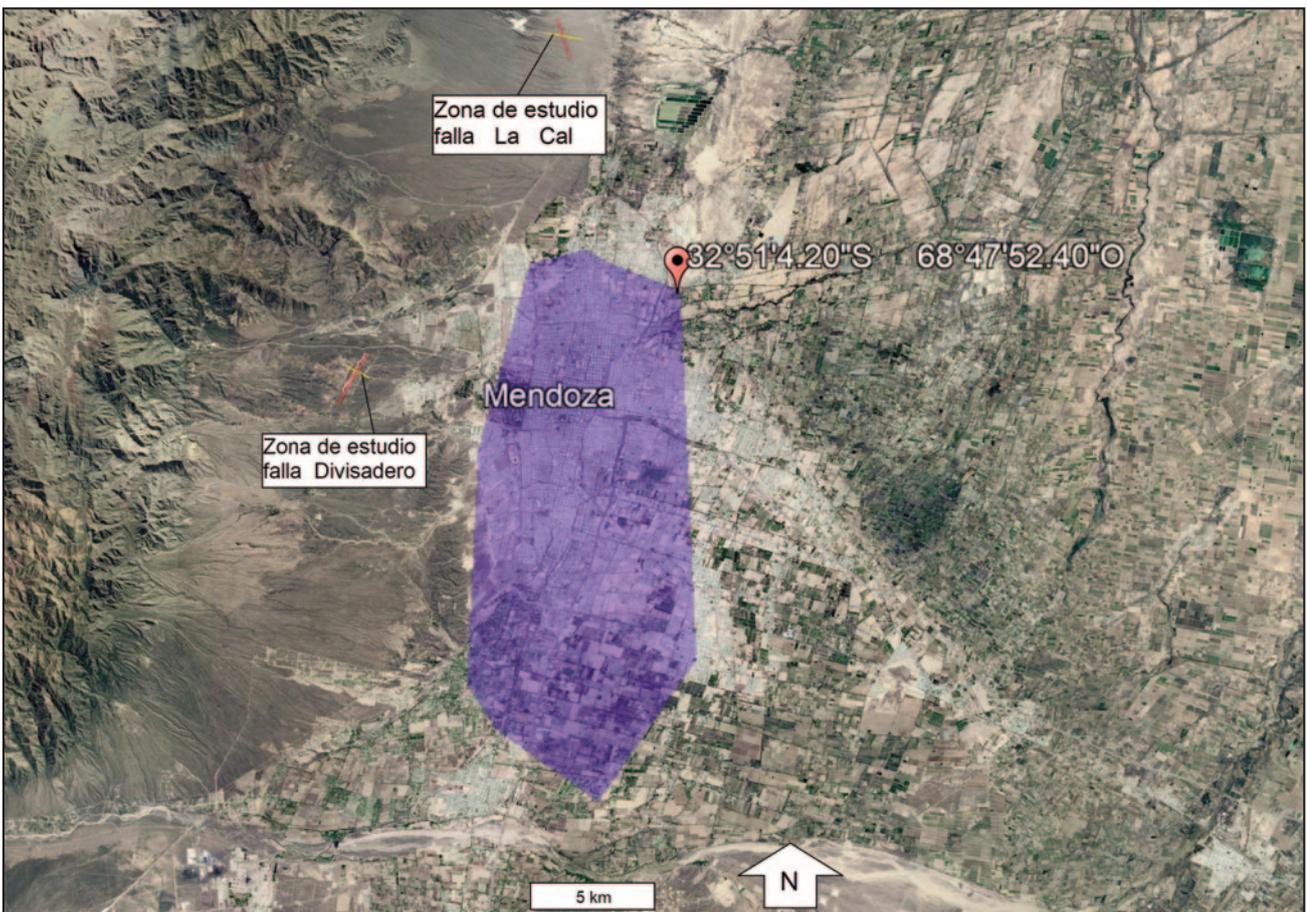


Figura 6. Zona de Mendoza bajo estudio en azul (Giolo et al. 2018) y zonas de las fallas estudiadas.

RESULTADOS

Falla La Cal

La falla Cerro La Cal se ha caracterizado al norte de la ciudad de Mendoza y al parecer su traza continuaría hacia el sur ingresando por la calle Perú. La falla La Cal está localizada a pocos kilómetros al este del frente montañoso y corta depósitos de abanico aluvial Pleistoceno-tardío y Holocenos. Hacia el norte la traza de la falla es variable, con dirección principal N-S, y una longitud de 30,7 km (Mignonance, 2006). Es una falla inversa y en superficie se manifiesta como una escarpa con frente hacia el este con inclinación entre 40 a 50° al oeste. Las escarpas alcanzan 16 m en niveles aluviales pleistocenos y 2 a 3 m en depósitos modernos.

Luego de realizadas las mediciones y procesado los datos como se indicó anteriormente, se determinaron las frecuencias y periodos del suelo en cada estación de medición. Se realizaron mediciones de 15 minutos con una frecuencia de muestreo de 200 Hz y para el procesamiento se tomaron ventanas de 50 segundos a fin de abarcar un rango entre 0.1 Hz y 100 Hz, valores adecuados para las frecuencias de suelo estudiadas. Los resultados obtenidos de las mediciones realizadas sobre la Falla La Cal, se presentan numéricamente en la Tabla 2 y gráficamente en la Figura 7.

Tabla 2. Resumen del periodo y frecuencia de cada punto de medición.

| Punto | T [s] | f [Hz] | Coordenadas | |
|-------|-------|--------|-------------|------------|
| A | 0.049 | 20.3 | -32.758612 | -68.834686 |
| B | 0.033 | 30.1 | -32.758357 | -68.839660 |
| C | 0.015 | 65.9 | -32.755683 | -68.844464 |
| D | 0.015 | 65.9 | -32.754284 | -68.851607 |
| E | 0.011 | 92 | -32.754060 | -68.857292 |
| F | 0.016 | 62 | -32.753717 | -68.862585 |

Se aprecia una variación en las frecuencias de suelos entre los puntos medidos, mostrando valores desde 20 Hz, zona más alejada a la traza de la falla, hasta 92 Hz sobre la traza de la falla para luego volver a descender una vez pasada la traza. El gráfico de la Figura 8 presenta la variación de la frecuencia y el periodo fundamental del suelo en la distancia entre los puntos medidos. Si se tiene en cuenta que la falla inversa presenta el bloque levantado al oeste los resultados obtenidos dan cuenta de la presencia de menor potencia de sedimentos sobre esa margen, alcanzando un pico sobre la traza. A medida que nos alejamos al este las frecuencias bajan lo que permite inferir un estrato sedimentario de mayor potencia.

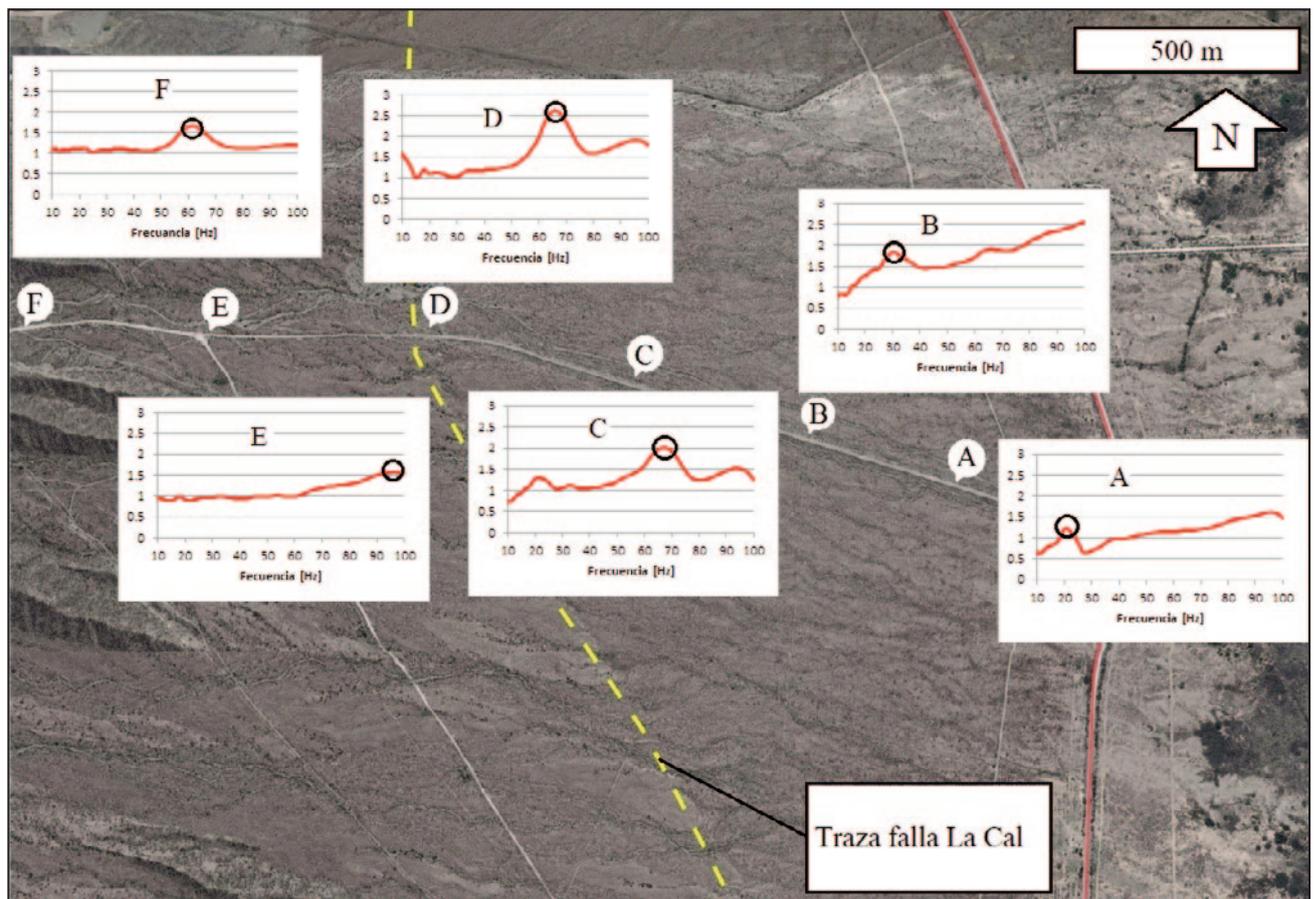


Figura 7. Espectros H/V de los 6 puntos medidos en un perfil transversal a la traza de la falla La Cal. En amarillo la traza de la falla, en gris el perfil de mediciones, sobre un camino.

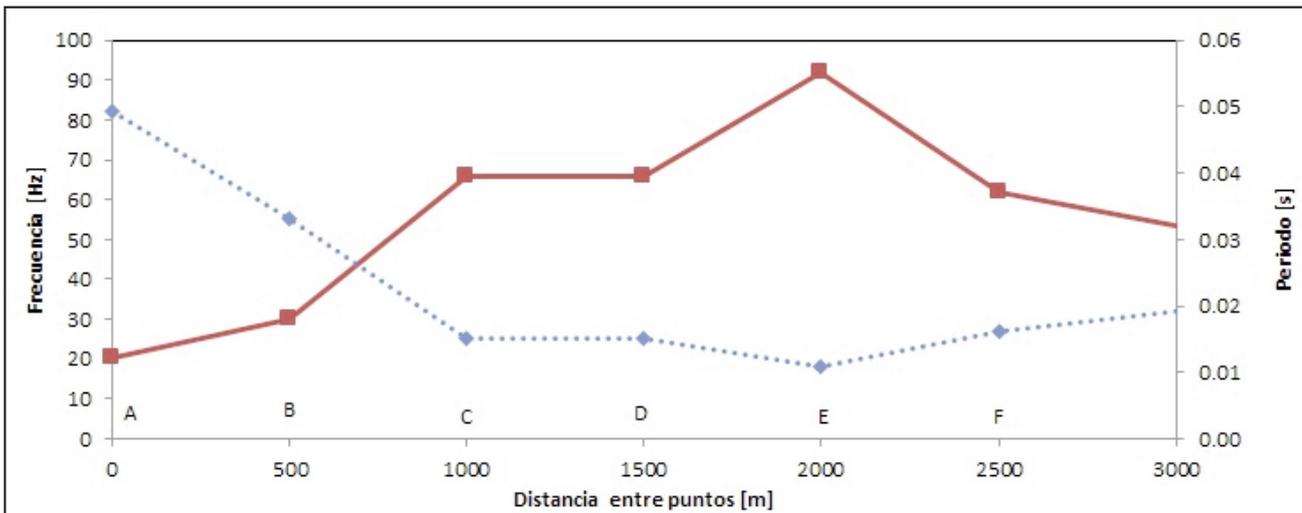


Figura 8. Variación del periodo del suelo (línea de puntos azul) y la frecuencia del suelo (línea roja continua) entre punto y punto.

Falla Divisadero Largo

La falla Divisadero Largo posee un rumbo aproximado norte-sur y atraviesa toda la zona de estudio; es una falla inversa con inclinación al oeste de aproximadamente 30°. Sobre su traza se alinean los puestos de Las Higuieritas, la Cieneguita y Agua de la Batea, alcanzando una longitud total aproximada de unos 13 km. La falla Divisadero Largo pierde rechazo hacia el sur. En la reserva Divisadero Largo, dicha estructura levanta rocas triásicas de la Formación Potrerillos por encima de sedimentos cuaternarios (Rodríguez y Barton, 1990), mientras que un poco más al sur pone en contacto rocas de la Formación Río Blanco sobre el mismo cuaternario. En este caso las mediciones se realizaron menos espaciadas y debido a las irregularidades topográficas la medición fue más compleja. La Figura 9 muestra dos espectros H/V con una separación de sólo 15 m una de otra. En la misma puede verse la diferencia en las frecuencias, para el primer espectro donde el estrato de suelo es de mayor profundidad (roca más profunda), la frecuencia del suelo es aproximadamente 3 Hz, y en la zona donde la roca es más superficial la frecuencia es de 63 Hz.

Zona Metropolitana de Mendoza

Una síntesis de los resultados de los estudios realizados por Giolo et al. (2018) se presentan en forma de mapa en la Figura 10. El principal objetivo era realizar una microzonificación de la ciudad de Mendoza a fin de delimitar áreas expuestas a efectos de sitio (zonas de gran amplificación del movimiento durante un terremoto). La Figura 10 muestra un mapa de isoperiodos del suelo. En dicho mapa puede observarse una zona de bajos periodos hacia el sudoeste. Se identifica claramente visible una línea donde los periodos cambian abruptamente contrastando con las variaciones más graduales del resto del área. Esta anomalía puede entenderse como la existencia de cambios en las condiciones del subsuelo. Este cambio puede originarse como fruto de la variación de alguno de los dos parámetros mencionados anteriormente (o de ambos): la velocidad de onda de corte y el espesor del sedimento. Si se correlaciona la Figura 10 con un mapa de fallas puede apreciarse que la variación de frecuencias encontrada queda alineada con la traza del anticlinal El Borbollón (Figura 11).

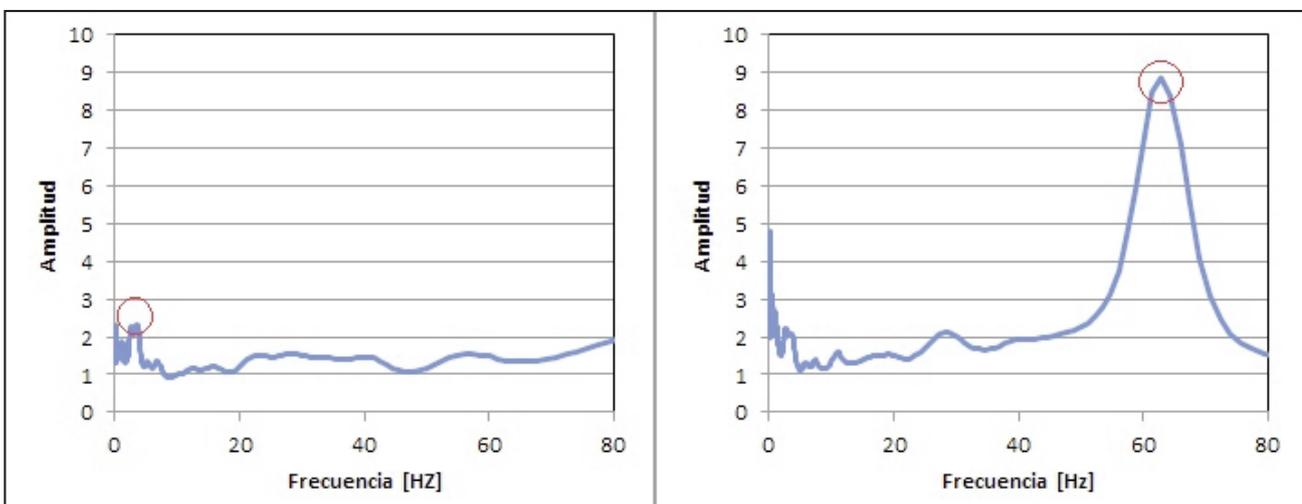


Figura 9. Espectro de Fourier de dos sitios cercanos en la zona de la falla Divisadero Largo.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha descrito la técnica del cociente espectral obtenido a partir del registro de vibración ambiental. La técnica permite determinar la frecuencia (o periodo) de la columna de suelo presente entre la superficie y el lecho rocoso. A partir de resultados de investigaciones previas, se detecta que la técnica puede capturar variaciones del sustrato por lo que puede ser aplicada para identificar estructuras ciegas, en particular fallas o estructuras potencialmente sismogénicas.

Con tal fin se muestran los resultados de tres campañas de medición de vibraciones ambientales con acelerómetros a fin de obtener la frecuencia (o el periodo) del sitio mediante la técnica H/V. En las dos primeras campañas de medición se realizaron perfiles transversales a la traza de las fallas conocidas y con manifestación superficial, ellas son: Divisadero Largo y La Cal. Allí se encontraron variaciones de la frecuencia del suelo a ambos lados de la traza revelando las distintas potencias de los estratos de suelo hasta la roca. Estas mediciones permitieron constatar la capacidad de la técnica para identificar estructuras a fin de poderla aplicar para detectar la presencia de estructuras sin manifestación superficial.

La tercera campaña realizada con anterioridad en la ciudad de Mendoza fue representada en un mapa, donde se aprecian marcadas variaciones de frecuencia de suelo alineadas. Dicha alineación coincide, en algunos sectores, con el cauce del canal Caciue Guaymallén, el cual ha sido identificado en la microzonificación de Mendoza con una posible falla (*Nafá y Zamarbide, 1989*). Adicionalmente, el lineamiento encontrado se muestra como una continuidad en uno de sus extremos con el anticlinal Borbollón y en el otro extremo con la zona de fallas inferida en la Puntilla (*Frau et al. 2010; Moreira et al. 2014*). En función de estos resultados se plantea la hipótesis de la existencia de una falla inversa, con vergencia al oeste atravesando el área del gran Mendoza.

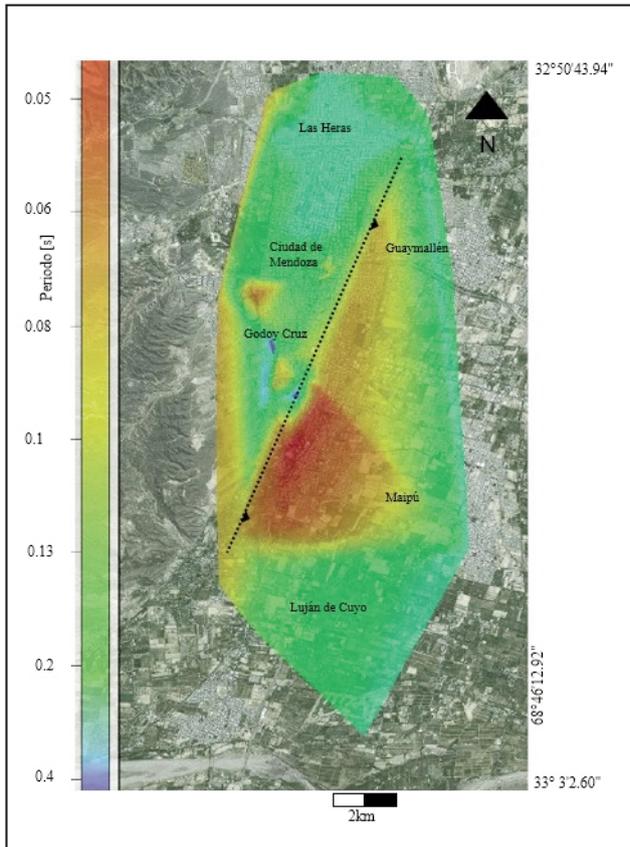


Figura 10. Mapa de periodos del suelo de la zona estudiada por Giolo et al. (2018).

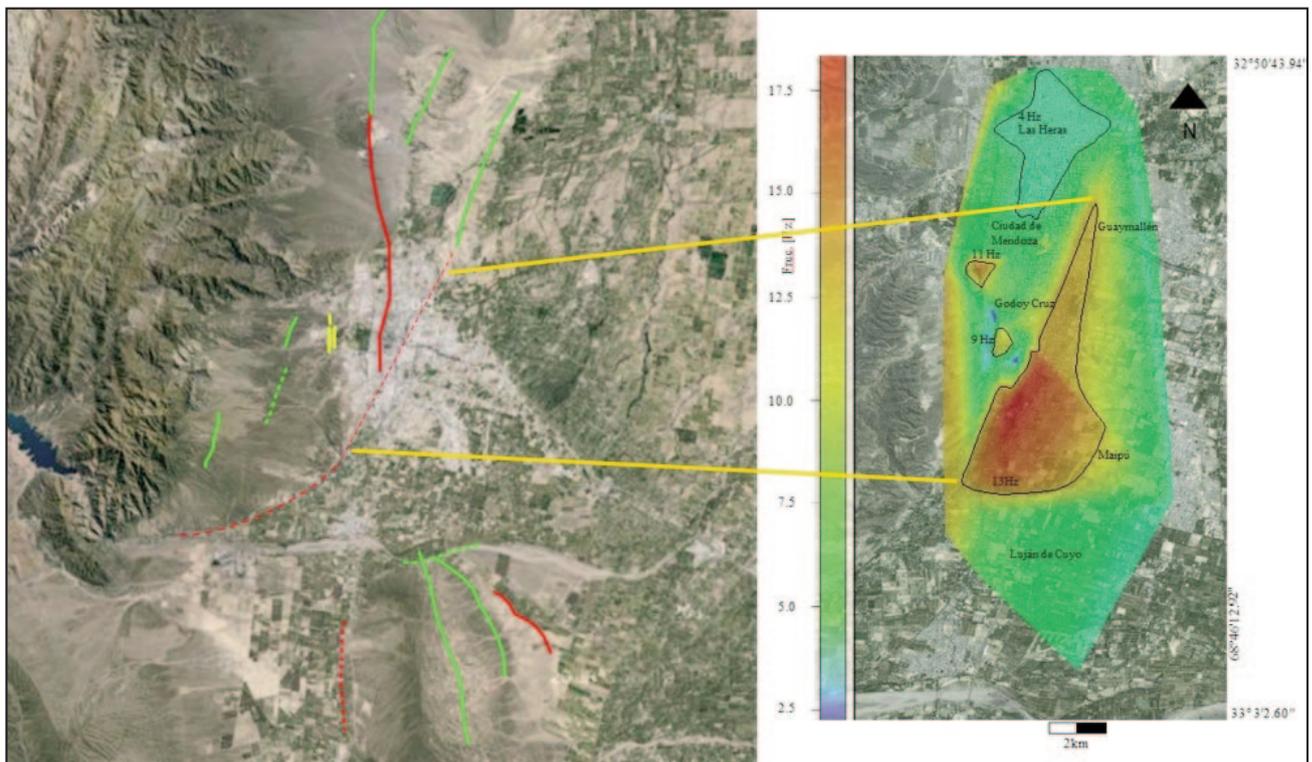


Figura 11. Falla inferida en la ciudad de Mendoza en correspondencia con el anticlinal El Borbollón y otras fallas cercanas.

Se concluye que el método utilizado en este trabajo es una herramienta de utilidad para la identificación de estructuras ciegas, aunque debido a que el periodo fundamental es dependiente de dos variables, la profundidad del estrato y la velocidad de onda de corte, es adecuado complementar los resultados de esta técnica con de otros métodos de auscultación de estructuras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a los Ingenieros Hernán Rodríguez, Marcelo Guevara y Natalia Roth, por la colaboración en este proyecto; al Dr. Bertrand Guiller, a la Dra. Elise Beck y al Ingeniero Armand Mariscal por sus aportes y ayuda. También se agradece a la Universidad Tecnológica Nacional por el financiamiento del presente proyecto (ECUTNME 4343).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BAILEY, A. D. (1974).
Near-surface fault detection by magnetometer.
Calif. Geol. 27, 274.
- BASTÍAS, H. 1985.
Fallamiento Cuaternario en la Región Sismotectónica de Precordillera.
San Juan, Argentina: Universidad Nacional de San Juan, 147.
- CALDERÓN, F. A., GIOLO, E. G., FRAU, C. D., GUEVARA, M. G. J., RODRIGUEZ, H. TORNELLO, M., LUJAN, F. AND GALLUCCI, R. 2017.
Seismic Microzonation and Site Effects Detection Through Microtremors Measures: A Review.
Chapter 9 in Handbook of Research on Trends and Digital Advances in Engineering Geology Edited by Nurcihan Ceryan.
pp 326 - 349. DOI: 10.4018/978-1-5225-2709-1.ch009.
- CAPUTO, R., PISCITELLI, S., OLIVETO, A., RIZZO, E., AND LAPENNA, V. (2003).
The use of electrical resistivity tomographies in active tectonics: Examples from the Tyrnavos Basin, Greece.
J. Geodyn. 36(1-2), 19-35.
- COSTA, C. H., AUDEMARD F. A., BEZERRA F. H., LAVENU R. A., MACHETTE M. N. Y PARÍS G. 2006.
An overview of the main quaternary deformation of South America.
61, nº 4: 461-479.
- COSTA, C. Y OTROS 2000.
Map and database of quaternary faults and folds in Argentina.
Open-File Report 00-0108. USGS, International Lithosphere Program, Task Group II-2, Major Active Faults of the World.
- CORTÉS, J. M., VNICIGUERRA P., YAMÍN M. Y PASINI M. M. 1999.
Tectónica cuaternaria de la Región Andina del Nuevo Cuyo (288-388 LS).
Geología Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino, Subsecretaría de Minería 29: 760-778.
- CRONE, A.J., AND HARDING S.T., 1984,
Relationship of late Quaternary fault scarps to subjacent faults, eastern Great Basin,
Utah: Geology, v. 12, no.5, p.292-295.
- DU, Y., XU, P., LING, S., TIAN, B., YOU, Z. AND ZHANG, R. 2019.
Determining the soil-bedrock interface and fracture-zone scope in the central urban area of the Jinan city, China, by using microtremor signals.
Journal of Geophysics and Engineering 0, 1-10, doi:10.1093/jge/gxz040
- FRAU, C. D., GALLUCCI, A. R., MOREIRAS, S. M. Y GIAMBIAGI, L. B. 2010.
Estudio de Peligrosidad Sísmica para el Proyecto Urbano Palmares Valley.
Informe Técnico Nº 16 / 010 (inédito) CEREDETEC, Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Mendoza.
- GIOLO, E., FRAU, C., CALDERON, F., PAGANO, S. Y TORNELLO, M. (2018).
Frecuencias naturales de suelos en el núcleo urbano de la ciudad de Mendoza.
Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras Vol. 23,2, 157 - 188 (2018), doi: 10.24133/riie.v23i2.967
- GRAUCH, V. J. S. (2001).
High-resolution aeromagnetic data, a new tool for mapping intrabasinal faults: Example from the Albuquerque basin, New Mexico.
Geology 29(4), 367-370.
- GRAUCH, V. J. S. (2002).
High-resolution aeromagnetic survey to image shallow faults, Dixie Valley geothermal field, Nevada.
U.S. Geol. Surv. Open File Rep. 02-384, p. 13.
- GOSAR, A. AND LENART, A. 2010.
Mapping the thickness of sediments in the Ljubljana Moor basin (Slovenia) using microtremors.
Bulletin of Earthquake Engineering 8:501-518. DOI 10.1007/s10518-009-9115-8.

- HAMMOND, C. J., SPRENKE, K. F., AND HAMMOND, W. R. (1986).
Ground-penetrating radar field tests in northern Idaho.
In Proceedings of the 22nd Symposium on Engineering Geology and Soils Engineering, pp. 53-68. Boise State University, Boise, ID.
- HELLEL, M., OUBAICHE, E. H., CHATELAIN, J. L., MACHANE, D., BENSALAM, R., GUILLIER, B. AND CHEIKHLOUNIS, G. 2012.
Basement Mapping with Single-Station and Array Ambient Vibration Data: Delineating Faults under Boumerdes City, Algeria.
Seismological Research Letters Volume 83, Number 5 September/October 2012. doi: 10.1785/0220110142.
- KUO, S. S., AND STANGLAND, H. G. (1989).
Use of ground-penetrating radar techniques to aid in the design of on-site disposal systems.
In Engineering Geology and Geotechnical Engineering (R. J. Watters, Ed.), Proceedings of the 25th Symposium on Engineering, pp. 11-18. A. A. Balkema, Rotterdam.
- MCCALPING, 2009.
Paleoseismology,
International Geophysics, 2009 - Elsevier.
- MINGORANCE, F. (2006).
Morfometría de la escarpa de falla histórica identificada al norte del cerro La Cal, zona de falla La Cal, Mendoza.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 61 (4): 620-638.
- MOREIRAS, S. M., GIAMBIAGI, L. B., SPAGNOTTO, S., NACIF S., MESCUA J., Y TOURAL, R. 2014.
El frente orogénico activo de Los Andes centrales a la latitud de la ciudad de Mendoza (32°50'-33°S).
Andean geology 41, n° 2: 342-361.
- NAFÁ Y ZAMARBIDE, 1989.
Microzonificación sísmica del Gran Mendoza, República Argentina.
Resumen Ejecutivo, Volume I y II. San Juan, Argentina: Instituto Nacional de Prevención Sísmica
- NAKAMAURA, Y. 1989.
A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremors on the ground surface.
Quarterly Report of Railway Technical Research Institute 30: 25-33.
- NAKAMURA, Y. 2000.
Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications.
Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand. Paper 2656.
- NAKAMURA, Y. 2008.
On the H/V spectrum. Proceedings of the 14th World Conferencia on Earthquake Engineering.
Beijing, China.
- PERUCCA, L., MEHL A. E. Y ZÁRATE M. A. 2009.
Neotectónica y sismicidad en el sector norte de la depresión de Tunuyán, provincia de Mendoza.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 64: 262-273.
- REGAIRAZ, A., Y ZAMBRANO, J. 1991.
Unidades morfoestructurales y fenómenos neotectónicos en el norte de la provincia de Mendoza (Andes Centrales Argentinos entre 32° y 34° latitud sur).
Bamberger Geographische Schriften 11: 1-21.
- RODRÍGUEZ, E.J. Y BARTON, M. 1990.
Geología del pie de monte del oeste de la ciudad de Mendoza.
10° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 460-463.
- TEBBOUCHE, M. Y., MACHANE, D., CHABANE, S., OUBAICHE, E., MEZIANI, A. A., BENAMAR, D. A., MOULOUEL, H., LOUNIS, G.C., BENSALAM, R., BENDAOU, A. (2017).
"Imagery of the metamorphic bedrock roof of the Sahel active fault in the Sablettes (Algiers) reclaimed area by ambient vibration HVSr.
Arab J Geosci 10:292. DOI 10.1007/s12517-017-3074-1