

Microzonificación sísmica basada en efectos de sitio para el área metropolitana de Mendoza

Sismic microzonation based on site effects for the metropolitan area of Mendoza

Presentación: 04 y 05 de Octubre de 2022

Doctoranda:

Emilce Gisela Giolo

Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería sísmica (CeReDeTEC), Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional – Argentina.
emilce.giolo@frm.utn.edu.ar

Director:

Carlos Daniel Frau

Codirectores:

Bertrand Guillier

Miguel Eduardo Tornello

Resumen

En este trabajo se presenta un aspecto del ordenamiento territorial en zonas sísmicas, el efecto de sitio. Se escoge para el desarrollo de este, un área de gran densidad poblacional en la Ciudad de Mendoza, Argentina para realizar una microzonificación sísmica en base a frecuencias naturales de suelo que se obtienen mediante el procedimiento del cociente espectral H/V, el cual es un procedimiento empírico basado en vibraciones ambientales. De esta manera se pretende identificar las áreas expuestas al fenómeno de amplificación sísmica cuando sobrevenga un terremoto de mediana o elevada magnitud. Este estudio se enmarca dentro de los proyectos de investigación ECUTNME0004343 y ECECBME0008099TC, y permitirá contar con información de utilidad para la organización del uso del suelo y la planificación urbana.

Palabras clave: Microzonificación sísmica – frecuencia del suelo – efecto de sitio.

Abstract

This paper presents an aspect of land use planning in seismic zones, the site effect. An area of high population density in the City of Mendoza, Argentina, is chosen for the development of this area to carry out a seismic microzoning based on natural ground frequencies that are obtained through the H/V spectral ratio procedure, which is an empirical procedure based on environmental vibrations. In this way, it is intended to identify the areas exposed to the phenomenon of seismic amplification when an earthquake of medium or high magnitude occurs. This study is part of the research projects ECUTNME0004343 and ECECBME0008099TC, and will provide useful information for the organization of land use and urban planning.

Keywords: Seismic Microzonation – Frequency of Soil - Site Effect.

Introducción

El ordenamiento territorial de una región debe contemplar distintos aspectos que hacen a las características del entorno y al hábitat humano inserto en ella. Entre los aspectos a considerar se encuentran los riesgos naturales. Si la

región geográfica en cuestión es una zona tectónicamente activa, deben contemplarse los múltiples aspectos relacionados con la ocurrencia de terremotos. La identificación de áreas con diferentes potenciales de amenaza sísmica es necesaria para el ordenamiento territorial de aquellas ciudades cercanas a fuentes sísmicas en orden a reducir el riesgo y la vulnerabilidad de los edificios y de las obras de infraestructura. Algunos de los peligros potenciales asociados a la actividad sísmica son la licuación de suelos, deslizamiento de tierras, caída de rocas, efectos de sitio debido a terremotos, variaciones topográficas, tsunamis entre otros. Es bien conocido que las condiciones y efectos locales de un sitio son un factor de importancia en la respuesta de suelos blandos ante terremotos y que este aspecto necesita ser considerado adecuadamente (Bendimerad, F. 2003). Desde hace ya varias décadas que la inclusión de efectos de sitio en los códigos de diseño sísmico ha recibido gran atención por parte de la comunidad ingenieril (Chavez-García y Faccioli 2004, Adams y Atkinson 2003). La respuesta de sitio puede ser evaluada por métodos teóricos o empíricos. Entre los métodos experimentales para considerar efectos locales, han tenido gran aceptación en las últimas décadas los basados en microtemores o vibraciones ambientales. Mediante el análisis de las mediciones de vibraciones ambientales se puede determinar el período fundamental de oscilación cuando existe un contraste de impedancia importante entre los estratos que conforman el depósito sedimentario (Lermo y Chavez-García 1994). Entre las diferentes técnicas que utilizan microtemores, el método de las relaciones espectrales H/V conocido como método de Nakamura (Nakamura 1989) ha alcanzado una gran aceptación por lo que ha sido aplicado en un gran número de regiones diferentes en todo el mundo. Entre otras razones, su amplia difusión se debe a que sólo requiere analizar los datos registrados por una estación de tres componentes emplazada en la superficie del sitio a auscultar. La sismicidad de Argentina es consecuencia de la convergencia de las placas Sudamericana y de Nazca; dentro de este marco, el piedemonte andino de la Provincia de Mendoza reúne una buena parte de la deformación tectónica reciente asociada al crecimiento de la Cordillera de los Andes que se manifiesta por la concentración de la sismicidad (Bastías et al. 1993, Modaresi et al. 1998). Los epicentros de los sismos registrados indican que la mayor parte de la actividad sísmica se concentra en el centro-oeste de nuestro país caracterizando a la región como de “elevada actividad sísmica”. Esta elevada sismicidad puede conjugarse con características particulares del subsuelo provocando efectos de sitio, esto es amplificación de las ondas sísmicas debido a la baja rigidez del sustrato que media entre la superficie del suelo y el basamento. La exposición a este tipo de peligros es particularmente relevante para centros urbanos e infraestructuras críticas, por las potenciales pérdidas de vidas humanas y bienes que pueden resultar de ello. En el presente trabajo se escoge el área metropolitana de la provincia de Mendoza, Argentina para realizar una microzonificación sísmica en base a frecuencias naturales de suelo que se obtienen mediante el procedimiento del cociente espectral H/V. De esta manera se identifican las áreas expuestas al fenómeno de amplificación sísmica cuando sobrevenga un terremoto de mediana o elevada magnitud. Esta microzonificación permitirá contar con información de utilidad para la organización del uso del suelo y la planificación urbana.

Desarrollo

Efectos de Sitio

Se conoce como efecto de sitio a la respuesta sísmica del terreno con características significativamente distintas en amplitud, duración o contenido de frecuencias de un área relativamente reducida, con respecto al entorno regional. En otras palabras, podría decirse que el efecto de sitio es la transformación que sufren las ondas sísmicas desde la roca base hasta la superficie, pudiendo variar la amplificación de la onda en varios órdenes de magnitud. La naturaleza y la distribución de los daños que se pueden producir en las estructuras con la ocurrencia de un terremoto está muy influenciada por la respuesta del terreno frente a cargas cíclicas, como consecuencia de lo cual se produce una modificación de la señal sísmica (Aki, K. 1998). El estudio de la respuesta dinámica del suelo en el análisis de riesgo sísmico y en el diseño sismorresistente está siendo objeto de numerosos trabajos de investigación, sobre todo luego de los recientes terremotos ocurridos en el mundo (Northbridge, 1994; Kobe, 1995; Turquía, 1999; El Salvador, 2001; Chile, 2010; Nepal, 2015; Ecuador, 2016). La presencia de terrenos, considerados geotécnicamente como blandos, causa un aumento considerable de los daños generados por terremotos en todo tipo de estructuras situadas sobre ellos. La respuesta y la magnitud de la amplificación de la señal están controladas principalmente por las propiedades de los materiales geológicos, especialmente por sus características dinámicas como, las velocidades de corte, el espesor de las capas, la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso, y finalmente la diferencia de las Vs entre roca sísmica (± 800 m/s) y sedimentos (Aki, K. 1998, Borchardt, R. D. 1970).

Metodología

El método H/V consiste en la utilización de microtemores para la determinación de efectos de sitio a través de la frecuencia natural, mediante la realización de un cociente entre los espectros de Fourier de las componentes horizontales y verticales de un registro en el sitio estudiado. Se estima que los microtemores 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 a la frecuencia 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. Esta metodología 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 en el cual un suelo sedimentario está apoyado sobre un estrato rocoso donde la principal diferencia entre estos estratos es la velocidad de la onda S. Para el desarrollo del procedimiento, se 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 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. Considera que en el lecho rocoso la propagación de las ondas va a ser la misma en todas las direcciones $H_b(\omega) = V_b(\omega)$ se llega a la ecuación (1). Se puede estimar el efecto de sitio mediante $S_M(\omega)$, la ecuación (1) es conocida como Espectro de Cuasi Transferencia (QTS). Las mediciones se realizaron con acelerómetros modelo Basalt de Kinematics. Poseen un sensor triaxial interno (Epi Sensor Force Balance) y se alimentan con una batería de 12 V. Los acelerómetros fueron configurados para medir de forma continua, almacenando los registros cada 10 minutos, con una frecuencia de muestreo de 200 Hz. En este estudio se han seguido las directrices dada por el manual del proyecto SESAME (European Research Program, 2004) y el software Geopsy para el procesamiento de señales.

$$S_M(\omega) = \frac{H_s(\omega)}{V_s(\omega)} \quad (1)$$

Área de estudio

El área de estudio considerada encierra el área metropolitana de Mendoza, ésta incluye la zona más comercial de la Ciudad de Mendoza, administrativa y Centro Cívico, incluye también zonas residenciales de distintas jerarquías con edificios de altura. Comprende también el área netamente comercial del Departamento de Godoy Cruz, fundamentalmente en torno a los ejes de calle San Martín Sur y calle Brasil; el área residencial, se desarrolla en todo el Departamento, pero se halla de forma conjunta con la comercial; en este aspecto se incluye francamente a la zona de Villa Marini, la cual sufrió los mayores daños durante el terremoto de Mendoza de 1985. En cuanto al Departamento de Las Heras se contempla el área cívico y más comercial en su proximidad con la Ciudad Capital, donde también se produjeron importantes daños en el terremoto de 1985. En la figura 1 (derecha) se observa el área Metropolitana de Mendoza de acuerdo con el plan de ejecución Metropolitana del programa DAMI efectuado en el año 2013. Dentro del área Metropolitana se ha definido una grilla con los puntos a medir, la misma se ha realizado con una separación de 1000 m en toda la extensión, obteniendo un total de 298 puntos a estudiar (Figura 1, izquierda).

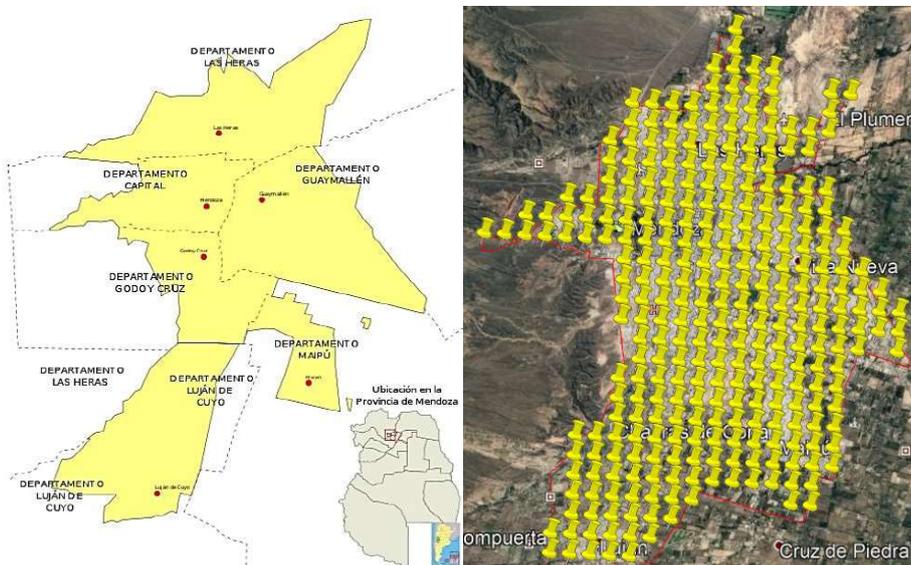


Figura 1: zona Metropolitana de Mendoza con grilla definida mediante pasos cada 1000m.

Resultados

En el presente apartado se vuelcan los resultados de las mediciones realizadas hasta el momento, donde se han obtenido las frecuencias naturales f_0 en cada uno de los sitios auscultado a partir de mediciones de vibración ambiental y aplicando el método de Nakamura. Una síntesis de los resultados de los estudios realizados se presenta en el mapa de la Figura 2 (izquierda), donde se muestran las frecuencias del suelo obtenido con los resultados de algunos puntos medidos dentro del área estudiada (Giolo et al. 2018). En dicho mapa puede observarse una zona de altas frecuencias hacia el sudoeste. Se identifica claramente visible una línea, que atraviesa el Gran Mendoza de Noreste a Suroeste, donde las frecuencias cambian abruptamente de un lado y del otro de dicha línea. Esta anomalía puede entenderse como la existencia de cambios en las condiciones del subsuelo. Este cambio puede originarse como fruto de la variación de algunos parámetros tales como la velocidad de onda de corte y/o el espesor del sedimento. La figura 2 (derecha) presenta un mapa de Intensidad Mercalli Modificada (IMM) correspondiente al terremoto de Mendoza de 1985. En la zona norte de la ciudad de Mendoza y la villa cabecera del departamento de Las Heras, se identificaron frecuencias más bajas mostrando coincidencia con la zona de mayores daños en el terremoto de 1985. Puede notarse que las zonas de Villa Marini y Villa Hipódromo sufrieron IMM VIII, las cuales coinciden con las zonas de altas frecuencias que se pueden visualizar en el mapa de la izquierda. Por otra parte, en la Figura 3 (izquierda) se observan los puntos auscultados en la zona de Corralitos, departamento de Guaymallén, Mendoza. La zona se caracteriza por la presencia de napa freática superficial; la misma oscila estacionalmente entre una cota de -0.50 y -1.50 m respecto de la superficie libre del suelo. Se conoce que toda la zona que rodea al área de medición se encuentra en esta condición. Los estratos superficiales se caracterizan por sedimentos finos de tipo limo. Desde el punto de vista urbanístico se puede mencionar que la zona, tradicionalmente de carácter agrícola, presenta un creciente desarrollo urbano. Los resultados obtenidos muestran que la frecuencia natural del sitio oscila aproximadamente entre 1.0 y 3.5 Hz, esto es períodos comprendidos entre 0.3 y 1.0 s. Estos valores se corresponden con sitios de baja rigidez en coincidencia con la evidencia geológica de la zona (Giolo et al 2017). En la figura 3 (derecha) se observa un ejemplo de uno de los puntos procesados mediante el programa Geopsy el cual permite organizar, ver y procesar señales geofísicas.

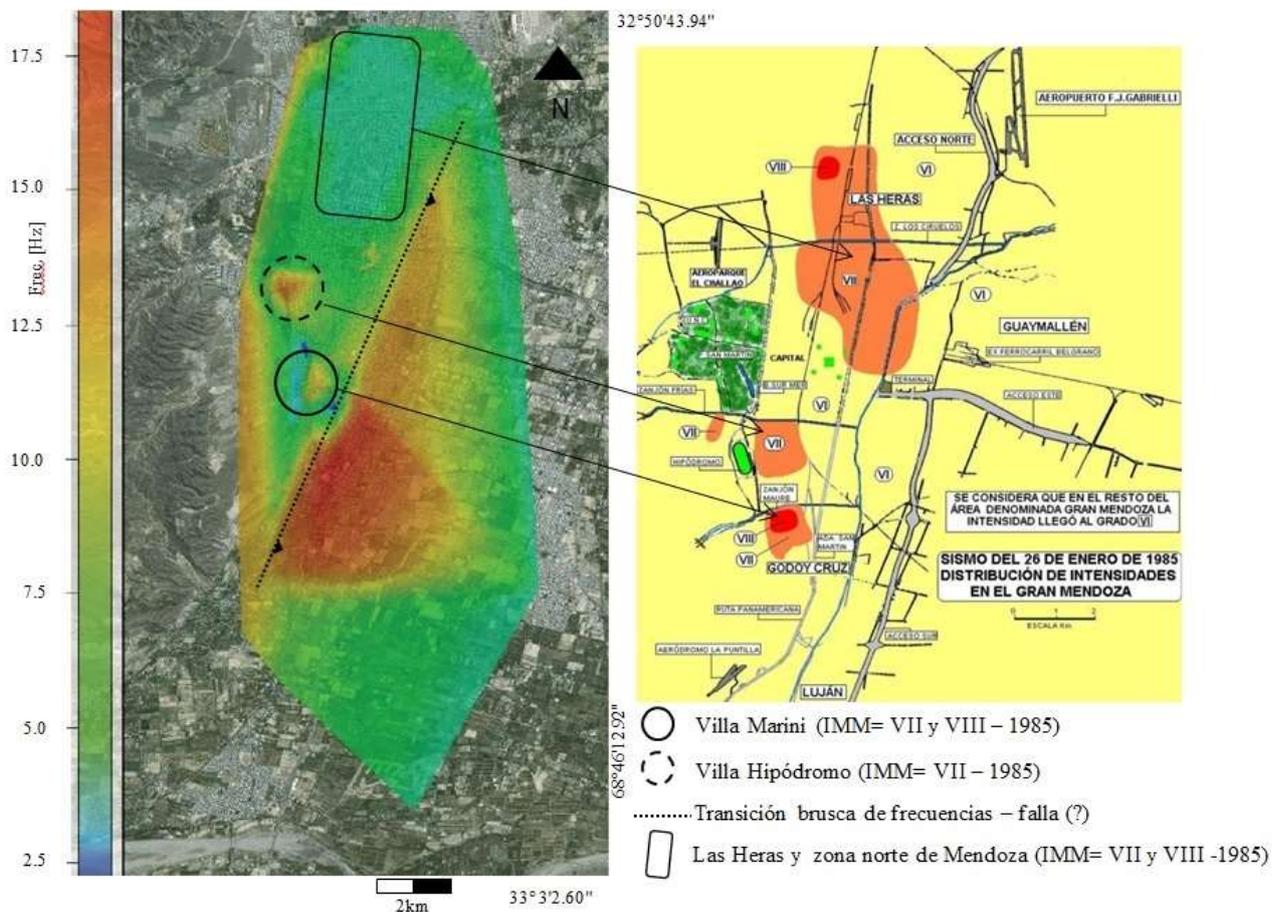


Figura 2: mapa de frecuencias del suelo tomando algunos puntos medidos dentro del área estudiada.

Investigaciones recientes (ej.: Hellel et al. 2012) han utilizado el método de Nakamura como complemento en la investigación de fallamientos y profundidad de estratos hasta el lecho rocoso. Considerando que existe una relación

teórica entre la velocidad de la onda de corte V_s y el periodo o frecuencia del suelo f , donde la V_s representa en cierta medida la rigidez de los estratos que atraviesa, es decir que suelos más rígidos tendrán velocidades mayores que suelos menos rígidos, y que adicionalmente la profundidad del estrato nos da una idea de la masa involucrada se podrían interpretar estas variaciones bruscas de frecuencia como: 1) los estratos a un lado y al otro de la línea tienen velocidades de onda de corte diferentes, y 2) Exista una variación del estrato de suelo sísmicamente activo, siendo de mayor profundidad en la zona al Oeste de la línea de trazo (frecuencias bajas) y de menor profundidad en la zona al Este de la línea de trazo (altas frecuencias). Esta última situación podría poner de manifiesto la presencia de una falla ciega inversa con vergencia al oeste, similar a las del sistema de falla del Cerro de La Gloria aflorantes 3 km al oeste. Esta hipótesis debe comprobarse con la ayuda de estudios complementarios.

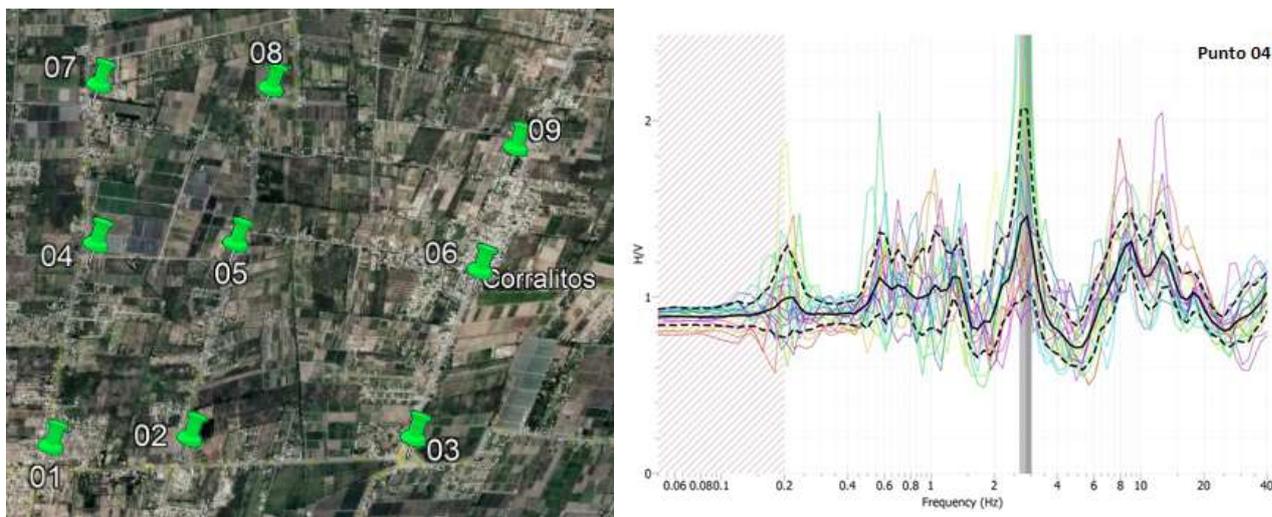


Figura 3: puntos auscultados en una zona con presencia de napa freática cercana. Ejemplo de uno de los puntos procesados a través de programa.

Conclusiones

En el área Metropolitana de Mendoza las frecuencias naturales de suelo encontradas hasta el momento presentan variaciones considerables que van desde los 2 Hz, suelos más blandos desde el punto de vista del diseño sismorresistente de estructuras, a los 18 Hz aproximadamente, siendo estos suelos más rígidos. En el mapa de la figura 2 (derecha) se observan dos islas correspondientes a la zona de Villa Marini (coincidente con las amplificaciones encontradas en los registros sísmicos) y Villa Hipódromo en el departamento de Godoy Cruz, Mendoza. En dichas islas las frecuencias obtenidas van desde los 2 Hz a 18 Hz. La presencia de estas variaciones indica ciertas perturbaciones en el sub-suelo, que podrían provocar mayores intensidades durante sismos locales, tal como ocurrió en dichas zonas durante el sismo del 25 de enero de 1985 en Mendoza. Se observa además que las frecuencias van en orden creciente hacia la zona del piedemonte, lo cual se corresponde con el sustrato más rígido tal como el que posee dicha zona. La variación de frecuencias detectada a lo largo de un eje que atraviesa el Gran Mendoza de Nor-Este a Sud-Oeste puede ser interpretada como la presencia de una falla inversa ciega. A partir de resultados de investigaciones previas, se detecta que la técnica del coeficiente espectral H/V puede capturar variaciones del sustrato por lo que puede ser aplicada para identificar estructuras ciegas, en particular fallas o estructuras potencialmente sismogénicas (Giolo et al., 2019). Además, con los valores de frecuencias obtenidas y estudios geofísicos complementarios, se pretende validar la técnica H/V utilizada. Por otra parte, en los 9 puntos estudiados en una zona del Departamento de Guaymallén, el cual posee napa freática superficial, las frecuencias naturales de suelo encontradas presentan variaciones que van desde 1 Hz a 3.5 Hz, desde el punto de vista del diseño sismorresistente de estructuras este tipo de suelos son considerados intermedios, esto también se ve influenciado por la presencia de napas freáticas superficiales existentes en la zona de estudio. Para ambos casos presentados, se concluye que la metodología de clasificación de sitios a través de su frecuencia natural obtenida mediante el cociente espectral H/V (o método Nakamura) es capaz de capturar los distintos escenarios confirmando su eficiencia para este fin.

Referencias

Adams, J., y G. Atkinson, (2003). Development of seismic hazard maps for the proposed 2005 edition of National Building Code of Canada. *Journal of Civil Engineering*: 30:255-71.

Aki, K. (1988). Local site effects on ground motion, in *Earthquake. Engineering and Soil Dynamics. Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, J. L. Von Thun (Editor), Geotechnical Special Publication No. 20, Am. Soc. Civil Eng., New York, pp. 103- 155.

Bastías, H., G. Perucca, y J. Paredes (1993). Peligro sísmico y neotectónica. En XII Congreso Geológico Argentino Relatorio, de V. Ramos, 645-658.

Bendimerad, F. 2003. The Boumerdes, Algeria, Earthquake, (2003). EERI Learning from Earthquakes Reconnaissance.

Borcherdt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motions near San Francisco Bay. En: *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 60, pp. 29 – 61.

Chavez-García, F. J., y Faccioli E. (2004). Complex site effects and building code: making the leap. *Seismol J.*: 4(1):23-40.

Di Alessandro, C., Bonilla L. F., Boore D. M., Rovelli A. y Scotti O. (2012). Predominant-Period Site Classification for Response Spectra Prediction Equations in Italy. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 102, n° 2: 680-695.

Giolo, E., Calderón, F., Pagano, S., Vía Gatica, S., Frau C. (2019). *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* N° 43, pag. 55 – 67 (2019).

Giolo, E., Frau, C., Calderón, F., Pagano, S., 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.

Giolo E., Calderón F., Luján F., Cueto A., Panella S. y Frau C. (2017). FRECUENCIA NATURAL DE SITIOS CON NAPA FREÁTICA SUPERFICIAL. E-ICES 12 12° Encuentro Internacional Ciencias de la Tierra. ISBN 978-987-1323-49-4.

Hellel, M., Oubaiche, E. H., Chatelain, J. L., Machane, D., Bensalem, R., Guillier, B. and Cheikhounis, 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.

Lermo, J., y Chavez-García, F. (1994). ¿Are microtremors useful in site response evaluation? *Bulletiin of Seism. Soc. American*, San Francisco: 1350-64.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quartely Report of Railway Technical Research Institute* 30: 25-33.

SESAME European Research Program (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations, measurements, processing and interpretation.225