

Cociente espectral H/V: Una herramienta para la microzonificación sísmica de la zona urbana de la ciudad de Manta - Ecuador

H/V spectral ratio: A tool for seismic microzonation of the urban area of the city of Manta – Ecuador

Presentación: 08 y 09 de Octubre de 2024

Doctoranda:

Dolly DELGADO TOALA

Profesora, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Circunvalación vía a San Mateo, Manta, Ecuador.

dolly.delgado@uleam.edu.ec

Director:

Carlos Daniel FRAU

Codirectora:

Noemi Graciela MALDONADO

Resumen

Este estudio aborda la importancia de proporcionar estimaciones confiables del movimiento del suelo para futuros terremotos, destacando el impacto de las condiciones locales del sitio. Utilizando el cociente espectral H/V, se evaluó el efecto de sitio en Manta, Ecuador, a partir de microtemores medidos en 186 puntos. De estos, 164 puntos resultaron válidos y se emplearon para calcular los periodos predominantes, generando un mapa de microzonificación sísmica. Se identificaron cinco microzonas correlacionadas con la geología local, revelando que las áreas con afloramientos rocosos presentan periodos más cortos, mientras que los depósitos aluviales en la parroquia Tarqui mostraron periodos más largos. Esto explica los mayores daños sufridos en esas áreas durante el sismo de Mw 7.8. Además, los periodos varían significativamente con el espesor de los sedimentos y la edad de los depósitos, con suelos aluviales recientes presentando periodos más altos que los afloramientos rocosos más antiguos.

Palabras clave: Cociente espectral H/V, microtemor, periodo, efecto de sitio, Manta

Abstract

This study addresses the importance of providing reliable estimates of ground motion for future earthquakes, highlighting the impact of local site conditions. Using the H/V spectral ratio, the site effect in Manta, Ecuador, was evaluated based on microtemors measured at 186 points. Of these, 164 valid points were used to calculate predominant periods, generating a seismic microzonation map. Five microzones were identified, correlated with local geology, revealing that areas with rock outcrops have shorter periods, while alluvial deposits in Tarqui parish showed longer periods. This explains the greater damage suffered in these areas during the Mw 7.8 earthquake. Additionally, periods vary significantly with sediment thickness and deposit age, with recent alluvial soils presenting higher periods than older rock outcrops.

Keywords: H/V spectral ratio, microtemor, period, site effect, Manta.

Introducción

Manta, un puerto en la costa del Pacífico ecuatoriano, ha evolucionado de un gran pueblo a un centro de desarrollo en las últimas cuatro décadas, impulsado por decisiones políticas e inversión público-privada. Esta dinámica ha atraído a personas de diversas regiones en busca de oportunidades. Manta se encuentra en la provincia de Manabí, cerca de la línea ecuatorial, y es un puerto natural de aguas profundas, lo que favorece su rol como un importante puerto internacional (Gobierno Provincial de Manabí, 2016). Estos factores han producido una gran densidad poblacional.

Históricamente, Ecuador ha estado expuesto a sismos destructivos, con Manta ubicada frente a la zona de subducción más significativa del país. En los últimos 100 años, la ciudad ha sido afectada por cinco sismos de magnitud superior a 7, el más reciente el 16 de abril de 2016, de magnitud Mw 7.8, que causó daños graves en la ciudad debido a la variabilidad de los materiales geológicos (GAD-MANTA, 2014).

El Ecuador está situado en la parte noroccidental de América del Sur, es un país con alto potencial sísmico ya que forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, donde se libera la mayor cantidad de energía sísmica a nivel mundial, con frecuentes sismos y actividad volcánica por la interacción de placas litosféricas al chocar o separarse entre ellas (Aguiar 2010; Dávila et al. 2017; Parra et al. 2018; Rivadeneira et al. 2007; Vera-Grunauer et al. 2016).

Desarrollo

En el estudio sísmico se debe considerar “El efecto de sitio” como la modificación de las ondas a través del medio de propagación que está formado por los estratos e irregularidades que existen bajo la superficie de la tierra, cuando las ondas atraviesan suelos blandos el movimiento o señal de entrada se amplifica de forma notable, este fenómeno no solo produce un aumento de la amplitud de las ondas sino también prolonga la duración del movimiento sísmico (Fernández, 2009; Tsige & García Flórez, 2006), producto de las irregularidades geológicas, la presencia de capas de suelo y la geometría irregular (Chávez-García & Montalva, 2014). Es decir, el Efecto de Sitio permite entender, el entorno geológico sobre el que está asentada la comunidad y lo determinante en los daños producidos por un terremoto (Rivadeneira et al., 2007).

Este estudio evalúa los efectos del sitio del área urbana de la ciudad de Manta de acuerdo con el enfoque más usado en los últimos años a nivel mundial, basado en el cálculo de la relación espectral horizontal sobre la vertical (H/V), que muestra la frecuencia fundamental y el factor de amplificación utilizando las grabaciones de microtemores (Chatelain et al., 2008; Chavez-Garcia & Cuenca, 1996; Fnais et al., 2010; Gok & Polat, 2012; Xu & Wang, 2021), con el objetivo final implementar la microzonación sísmica.

Nakamura diseñó una herramienta rápida y económica conocido como cociente espectral H/V, puede ser utilizado para realizar estudios de microzonificación en ambientes urbanos (Fnais et al., 2010; Ritta et al., 2012). Utiliza las componentes horizontales y verticales que se obtienen a través de los microtemores para determinar el movimiento de las capas superficiales del suelo (Nakamura, 1989), es decir que estima la función de transferencia aproximada de las capas superficiales de suelo y supone que los microtemores está compuesto por varios tipos de ondas. El método elimina el efecto de las ondas Rayleigh y considera que los microtemores en la base rocosa son similares en las componentes horizontales y verticales (Alfaro et al., 1998).

Metodología

El estudio emplea el método del Cociente Espectral H/V, que combina enfoques geofísicos, geotécnicos y conocimientos sobre las condiciones geológicas locales. Se utilizaron las directrices del proyecto Site Effects Using Ambient Excitations (SESAME) para garantizar la confiabilidad y robustez de la metodología aplicada, así como la seguridad en los resultados. Estas directrices incluyen estrictos criterios para evaluar la frecuencia natural de los sitios de interés, siguiendo las recomendaciones de Bard y el equipo de SESAME (2004).

La campaña de medición de microtremores en la ciudad de Manta comenzó con la distribución de 186 puntos de medición, organizados en una cuadrícula de 500 por 500 metros, conforme a las indicaciones de SESAME (2004). Para las mediciones, se utilizó un sismómetro triaxial Geobox SR-04 de "SARA electronic instruments", calibrado y orientado hacia el norte. Las grabaciones, de 300, 600 y 1200 segundos, se almacenaron en formato SAF. Los registros incluyeron parámetros detallados en la hoja de campo, como la ubicación, coordenadas UTM, fecha, hora, duración, condiciones de viento, densidad de edificaciones, tráfico, y posibles interferencias.

El procesamiento de los registros para obtener las frecuencias naturales del suelo (f_0) se realizó con el software GEOPSY, siguiendo las recomendaciones del fabricante del sismómetro. Los datos de vibración ambiental registrados por el sismómetro en las componentes N-S, E-O y Z fueron procesados, eliminando contaminantes mediante un algoritmo que selecciona la estación con menor variación. Se usaron al menos 10 ventanas de 10, 20, y 30 segundos para el análisis, aplicando el alisado de Konno y Ohmachi.

El rango de frecuencias analizado fue de 0.5 a 10 Hertz, relevante para identificar el contraste de impedancia entre los depósitos de las terrazas marinas y el basamento oceánico. El software genera curvas H/V mediante la superposición de espectros de Fourier, donde la curva promedio H/V se presenta en una línea negra continua. Las curvas de confianza, representadas por líneas discontinuas, reflejan la multiplicación y división de la curva promedio H/V por la desviación estándar de la amplitud (Wathelet et al., 2020). La frecuencia natural (f_0) se identifica generalmente en la amplitud máxima de la curva media H/V, asegurando así que los puntos de medición sean válidos y confiables.

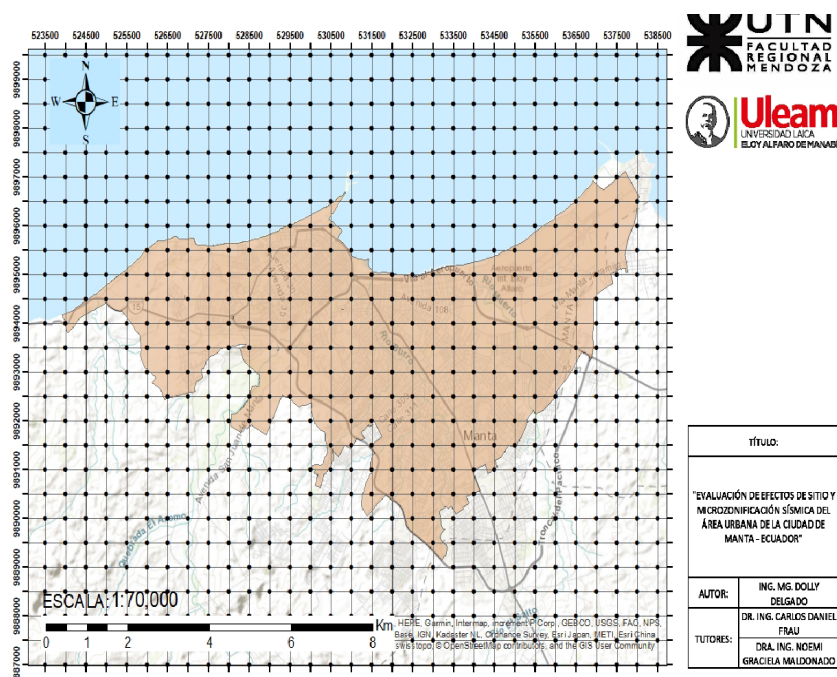


Figura 1. Mapa de la grilla de puntos sobre la zona urbana de Manta, con intervalos de 500 m. por 500 m.

El Método de Cociente Espectral H/V, combina enfoques geofísicos, geotécnicos y el conocimiento de las condiciones geológicas locales. El presente trabajo incluye las directrices de Site Effects Using Ambient Excitations (SESAME) para garantizar la confiabilidad de la metodología y del procesamiento de datos que garantiza la estabilidad, robustez y seguridad de los resultados. Las directrices son un conjunto de criterios estrictos, que se deben aplicar para evaluar la frecuencia natural de los sitios de interés (Bard & SESAME-Team, 2004). La comprobación de resultados de frecuencia fundamental tiene nueve criterios que están orientados a dar la gráfica con una curva confiable y un peak claro.

estimados están en el rango de 9,009 Hz ubicada en la parte alta en estadio universitario en donde existe la presencia de la Formación Tosagua y la más baja es de 0,537 Hz en Tarqui, por la distribuidora Coca Cola, estas frecuencias pertenecen a suelos sedimentario-aluviales.

Con los datos de las frecuencias se calcularon los periodos que representan las máximas amplitudes de onda, los cuales se grafican en la figura 2, para posteriormente ser clasificados en microzonas de acuerdo con la propuesta para la NEC-15 y correlacionarlas con las condiciones geológicas locales

La información geológica de Manta se basa en sesenta y un estudios de SPT, seis estudios de sísmica de refracción y seis estudios hidrogeológicos de pozos profundos, que permitieron caracterizar la zona de estudio, en la que la composición geológica es dispersa y heterogénea. Se hicieron dos cortes, la figura 3 corresponde al corte geológico- geotécnico A-B en donde se relaciona las columnas litológicas de la franja costera al Norte de Manta, dirección Oeste a Este, es una franja próxima a la línea costera de la ciudad. Presentan ciclos sedimentarios recientes, depositados en paleocauces, sobre yacen a lutitas rígidas de Tablazo y Tosagua de edad oligoceno- mioceno que afloran al Este de los sectores Umiña, Barbasquillo y al Oeste en Jaramijó.

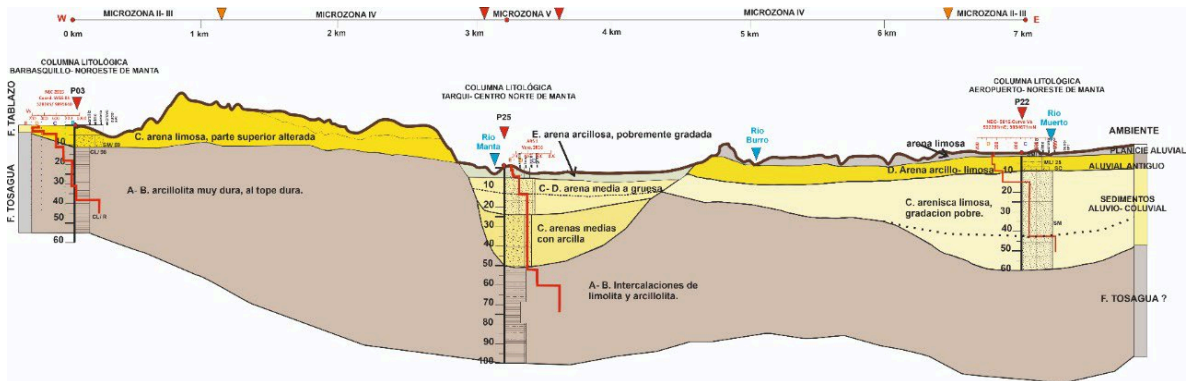


Figura 3. Corte A- B geológico- geotécnico, correlación de columnas litológicas en la franja costera al Norte de Manta, en dirección Oeste a Este, es una franja próxima a la línea de costa.

La figura 4, corresponde al corte geológico- geotécnico C-D, correlaciona las columnas litológicas que limitan al Sur de la zona urbana de Manta, desde la parroquia Manta en dirección sureste hacia la parroquia Eloy Alfaro y de allí hacia el Noreste hacia la parroquia Los Esteros. Los sedimentos blandos descritos disminuyen su espesor de 50 metros en la franja proximal costera a 25 metros en este corte, al contacto con la Formación geológica Tosagua. Nótese que en las columnas oeste y centro valores de N60 >100 probablemente son por efecto de bloques caídos durante la depositación, que podrían confundirse, sino se realizan estudios más detallados para la caracterización geológica, geotécnica del subsuelo de Manta.

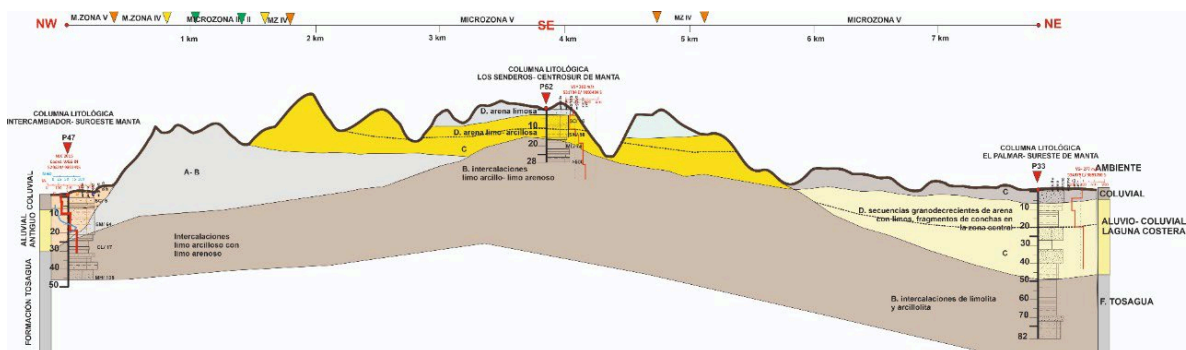


Figura 4. Corte C- D geológico- geotécnico Correlación de columnas litológicas para franja al Sur de Manta, en dirección de Oeste a Este, desde la parroquia Manta hacia la parroquia Eloy Alfaro y desde ese punto a la parroquia Los Esteros.

En el mapa de la figura 5, se establece la división de cinco microzonas de la Ciudad de Manta basada los períodos naturales del suelo y la propuesta de clasificación de sitio para la NEC-15, se subdividió la ciudad en cinco microzonas, porciones más pequeñas, asumiendo que cada una de ellas tendrán un comportamiento relativamente homogéneo durante un sísmico.

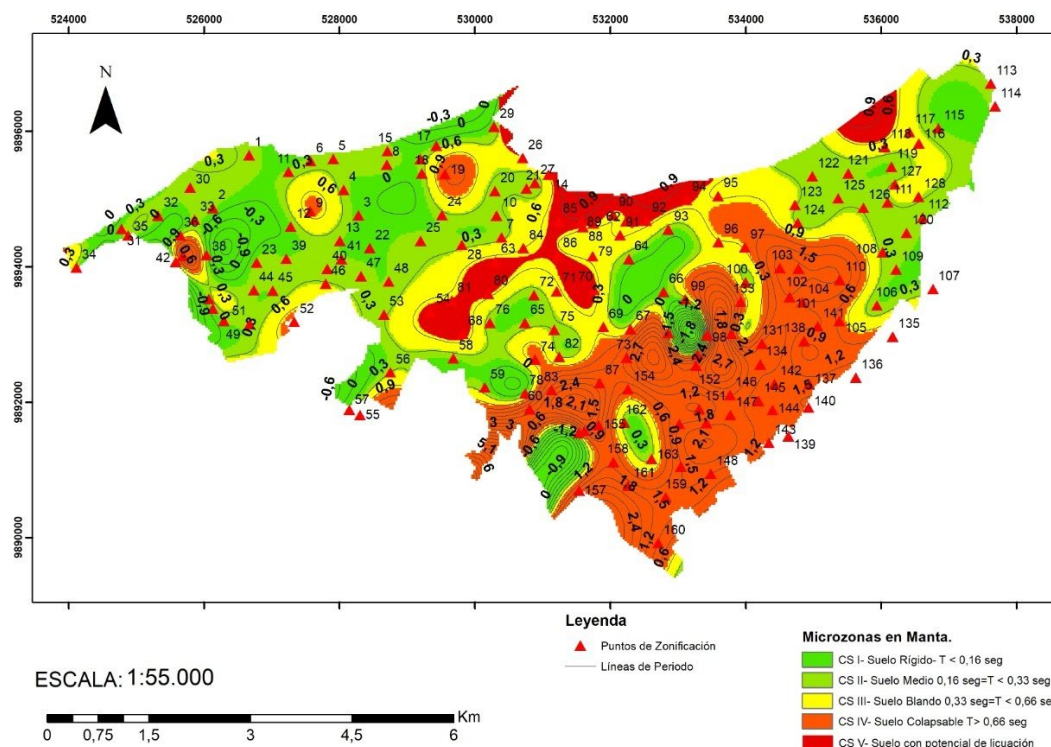


Figura 5. Mapa de microzonas de Manta basado en la propuesta de clasificación de sitio para la NEC - 15

Microzona I: Se caracteriza por perfiles de sitio Tipo A y B, sin amplificación sísmica, compuesta por rocas competentes, rígidas y consolidadas. Las velocidades de onda de corte (V_{s30}) superan los 760 m/s, y el período predominante del suelo es menor a 0,16 s. En el mapa de microzonificación se identifica con color verde intenso. Este tipo de material puede estar relacionado con las rocas calcáreas de la Formación Tablazo, visibles en las cercanías de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí y los tanques de Petroecuador en Barbasquillo.

Microzona II: Posee un perfil de sitio Tipo C, con sedimentos detríticos de grano grueso compactados y rocas débilmente cementadas. La V_{s30} oscila entre 360 m/s y 760 m/s, con periodos predominantes entre 0,16 s y 0,33 s, representados en el mapa con color verde claro. La microzona está formada por lutitas bien consolidadas y suelos residuales, derivados de procesos erosivos prolongados en las Formaciones Tablazo y Tosagua. La profundidad del basamento varía entre 17 m y 25 m.

Microzona III: Caracterizada por un perfil de sitio Tipo D, presenta sedimentos detríticos finos a medios, como arenas, limos y arcillas, poco compactados. La V_{s30} varía entre 180 m/s y 360 m/s, con periodos predominantes de 0,33 s a 0,66 s, representados en el mapa con color amarillo. La geología de la zona incluye areniscas erosionadas de la Formación Tablazo y suelos similares en las planicies altas y bajas de Manta, con una profundidad del basamento entre 20 m y 50 m.

Microzona IV: Corresponde a un perfil de sitio Tipo E, con suelos muy blandos y no consolidados, susceptibles a falla durante sismos. La V_{s30} es menor a 180 m/s, con periodos predominantes superiores a 0,66 s, representados en el mapa con color naranja. Estos suelos aluviales o coluviales, relacionados con depósitos de más de 3 m de espesor, cubren lutitas rígidas de las Formaciones Tablazo y Tosagua, con espesores de sedimentos entre 40 m y 60 m.

Microzona V: Incluye suelos inestables durante sismos, como suelos licuables, arcillas sensitivas y suelos orgánicos, con un perfil de sitio Tipo F. Representada en el mapa con color rojo, esta microzona está relacionada con depósitos aluviales en las planicies de inundación de los ríos Manta y Burro. Estos suelos, de baja compacidad y capacidad portante, presentan un alto riesgo de licuefacción, como lo evidenció el estudio de la Zona Cero Tarqui tras el sismo, debido al predominio de arenas sueltas y saturadas.

Conclusiones

La conclusión del estudio sobre la ciudad de Manta resalta su alta vulnerabilidad sísmica, evidenciada por movimientos sísmicos de magnitud mayor a Mw 7 en el último siglo. El sismo del 16 de abril de 2016 demostró cómo los suelos sedimentarios poco consolidados, propensos a licuación, amplifican significativamente el movimiento del suelo, causando daños estructurales severos.

El trabajo ofrece un valioso aporte en la identificación de la amplificación del movimiento del suelo en la ciudad, resultando en la elaboración de un mapa de períodos dominantes. Este mapa clasifica las áreas urbanas e industrializadas de Manta en cinco microzonas, basadas en la correlación entre el período predominante del suelo y la velocidad de las ondas de corte (V_s30), según la propuesta de clasificación de sitio de la NEC-15.

Las microzonas varían desde áreas con afloramientos rocosos (Microzona I), sin amplificación significativa, hasta zonas de suelos licuables (Microzona V), donde se prevén las mayores amplificaciones y el mayor peligro sísmico. La parroquia Tarquí, identificada como "zona cero" durante el sismo de 2016, es especialmente vulnerable debido a su localización sobre suelos aluviales saturados.

Finalmente, se destaca el uso del cociente espectral H/V como una herramienta eficaz para estudios de microzonificación sísmica, permitiendo obtener información precisa en un corto tiempo, lo cual ha sido fundamental para definir las microzonas sísmicas de Manta.

Referencias

- Aguiar, R. (2010). Peligrosidad Sísmica del Ecuador y descripción de los Puentes construidos sobre el Estuario del río Esmeraldas, con ahisladores de base FPS. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 15, 85–118.
- Alfaro, A., Navarro, M., Sanchez, J., & Pujades Beneit, L. (1998). *Microzonificación Sísmica de Barcelona. I*.
- Bard, P.-Y., & SESAME-Team. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations-measurements, processing and interpretations, SESAME European research project EVG1-CT-2000-00026, deliverable D23.12. August 2015*, 1–62. <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr>
- Chatelain, J. L., Guillier, B., Cara, F., Duval, A. M., Atakan, K., Bard, P. Y., Azzara, R., Bonnefoy-Claudet, S., Borges, A., Sorensen, M. B., Cultrera, G., di Giulio, G., Dunand, F., Fäh, D., Guéguen, P., Ripperger, J., Costa, P. T., Vassiliades, J. F., Vidal, S., & Wassner, J. (2008). Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(1), 33–74. <https://doi.org/10.1007/s10518-007-9040-7>
- Chavez-Garcia, F. J., & Cuenca, J. (1996). Short Note Site effects in Mexico City urban zone. A complementary study. In *Dynamics and Earthquake Engineering* (Vol. 15).
- Chávez-García, F. J., & Montalva, G. A. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y Proyectos*, 16, 6–30. <https://doi.org/10.4067/s0718-28132014000200001>
- Dávila, Á., Cuesta, R., Villagómez, M., León, M. F., & Fierro, D. (2017). Atlas del Sismo Ecuador 16 de abril del 2016. In IGM (Ed.), *Instituto Geográfico Militar* (Primera, Vol. 1, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Fernández, A. M. (2009). Inversión de efectos de sitio y factor Q utilizando cocientes espectrales. *Estudios Geológicos*, 65(1), 67–77. <https://doi.org/10.3989/egeol.39591.047>
- Fnais, M. S., Abdelrahman, K., & Al-Amri, A. M. (2010). Microtremor measurements in Yanbu city of Western Saudi Arabia: A tool for seismic microzonation. *Journal of King Saud University - Science*, 22(2), 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2010.02.006>
- Gok, E., & Polat, O. (2012). Microtremor HVSR Study of Site Effects in Bursa City (Northern Marmara Region, Turkey). In *Earthquake Research and Analysis* (pp. 225–236). www.intechopen.com
- NEC-SE-DS. (2015). *NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCION -NEC - SE- DS* (NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCION - NEC -15, Ed.). MIDUVI.

Parra, H., Benito, M., Gaspar, J., Fernández, A., Luna, M., & Molina, X. (2018). *Estimación de la peligrosidad sísmica en Ecuador continental* (Sandra Gue). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Av. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/13741>

Ritta, R. J., Suárez, L. E., & Pando, M. A. (2012). DETERMINACION DEL PERIODO FUNDAMENTAL DEL SUELO USANDO VIBRACION AMBIENTAL Y EL COCIENTE ESPECTRAL HORIZONTAL/VERTICAL. *Mecánica Computacional*, 31, 1399–1419. <http://www.efn.uncor.edu://www.amcaonline.org.ar>

Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007). *Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador*. Corporación Editorial Nacional.

Schmidt, V. (2011). Razones Espectrales En Sitios Donde Se Ubican Estaciones Acelerográficas de América Central. American Accelerographic Stations Are Located . Cases of El. *Revista Geológica de América Central*, 44, 9–26.

Tsige, M., & García Flórez, I. (2006). Propuesta de clasificación geotécnica del “Efecto Sitio” (Amplificación sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia. *Geogaceta*, 40, 39–42.

Vera-Grunauer, X., Quinde Martínez, P., Leonardo-Suárez, M., & Mera Ortiz, W. (2016). *Propuesta de actualización de la NEC-15 para el peligro sísmico probabilista en roca en el Ecuador*. UCSG.

Wathelet, M., Chatelain, J.-L., Cornou, C., Giulio, G. di, Guillier, B., Ohrnberger, M., & 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>

Xu, R., & Wang, L. (2021). The horizontal-to-vertical spectral ratio and its applications. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2021(1). <https://doi.org/10.1186/s13634-021-00765-z>

Zhao, J. X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P. G., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., & Ogawa, H. (2006). An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 914–925. <https://doi.org/10.1785/0120050124>