



REMI
Revista Multidisciplinaria
de Investigación

Revista Multidisciplinaria de Investigación, REMI | Vol. 4 Núm. 1,
enero- junio | 2025, pp. 59-74

ISSN-L 3006-7715

Universidad de El Salvador

<https://revistas.ues.edu.sv/index.php/remi>

Artículo original



<https://hdl.handle.net/>

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA A TRAVÉS DEL MÉTODO DE NAKAMURA PARA LA COLONIA EL PALMAR EN EL DEPARTAMENTO DE SANTA ANA

SEISMIC MICROZONATION USING THE NAKAMURA METHOD FOR THE EL PALMAR NEIGHBORHOOD IN THE DEPARTMENT OF SANTA ANA

Fecha de recepción 01/10/2025/ fecha de aceptación 05/15/2025

Gustavo Adolfo Morán Rodríguez¹

Resumen:

Introducción: El subsuelo está compuesto por una gran cantidad de materiales y estructuras geológicas diferentes, estos materiales tienen sus propias características físicas y mecánicas, por ejemplo, el color, la textura, la densidad, la porosidad, etc. Las propiedades mecánicas son de suma importancia ingenieril, ya que son estas las que se encargan de determinar como un sitio, es decir una porción de suelo geográficamente identificado, se comportara ante un sismo, o bien existe amplificación o atenuación sísmica; el movimiento no es igual para todos los sitios, ya que se ve afectado por el cambio de las características antes mencionadas. La amplificación sísmica de un sitio es un fenómeno que puede ocurrir debido a las variaciones de los materiales que conforman el subsuelo. **Objetivo:** El estudio se ha hecho para cada punto de registro obtenido, con el fin de obtener periodos predominantes para los 24 puntos, además poder generar un mapa con estos periodos predominantes y poder caracterizar de una mejor manera el comportamiento de los suelos

¹ Correo electrónico: mr20057@ues.edu.sv  Orcid: 0009-0003-5391-1318

para esos distintos sitios. **Método:** El método del cociente espectral H/V o conocido también como método de Nakamura ha sido de los más utilizados para la determinación de cambios en los periodos y amplitud del subsuelo, dicho método estudia las pequeñas vibraciones ambientales producidas de manera natural con fuentes como el viento, las olas del mar, así como movimiento antrópico que son medibles con sismómetros o acelerómetros.

Resultados: En Figura 9 los periodos menores a 4.5 segundos están caracterizados de color azul, mientras que los periodos arriba de 4.5 hasta 1 segundo están de color verde al rojo. El color rojo concentra los periodos más largos, por ende, son las zonas con frecuencias más largas, lo que significa mayor amplitud.

Palabras clave: Microzonificación, Nakamura, Riesgo sísmico, H/V.

Abstract:

Introduction: The subsurface consists of a wide variety of geological materials and structures, each with distinct physical and mechanical characteristics—such as color, texture, density, and porosity. The mechanical properties are critically important in engineering because they determine how a given location (i.e., a geographically defined section of soil) will behave during an earthquake—whether seismic waves will be amplified or attenuated. Ground motion isn't uniform across all sites; it varies depending on the properties mentioned above. The seismic amplification of a site is a phenomenon that can arise from variations in the materials that make up the subsurface. **Objective:** The study was conducted at each of the measurement points to identify the predominant periods at all 24 sites, and then to create a map displaying these dominant periods—enabling a better characterization of soil behavior at the different locations. **Method:** The spectral ratio H/V method, also known as Nakamura's method, is one of the most widely used techniques for detecting changes in subsurface period and amplitude. This approach analyzes ambient seismic noise—small, naturally occurring vibrations generated by wind, ocean waves, and human activity—using seismometers or accelerometers. **Results:** In Figure 9, periods shorter than 4.5 seconds are shown in blue, while periods between 4.5 and 1 second are shown in green to red. The color red represents the longest periods, which are therefore the areas with the longest frequencies, meaning greater amplitude.

Keywords: Microzonation, Nakamura, Seismic risk, H/V.

Introducción

El subsuelo está compuesto por una gran cantidad de materiales y estructuras geológicas diferentes, estos materiales tienen sus propias características físicas y mecánicas, por ejemplo, el color, la textura, la densidad, la porosidad, etc. Las propiedades mecánicas son de suma importancia ingenieril, ya que son estas las que se encargan de determinar como un sitio, es decir, una porción de suelo geográficamente identificado, se comportará al ser excitado por un sismo, o bien existe amplificación o atenuación sísmica; el movimiento no es igual para todos los sitios, ya que se ve afectado por el cambio de las características antes mencionadas. Entonces la mayor importancia de conocer la amplificación de un sitio es saber si es apto o no un suelo para poder construir sobre él.

Efecto de sitio (amplificación de sitio)

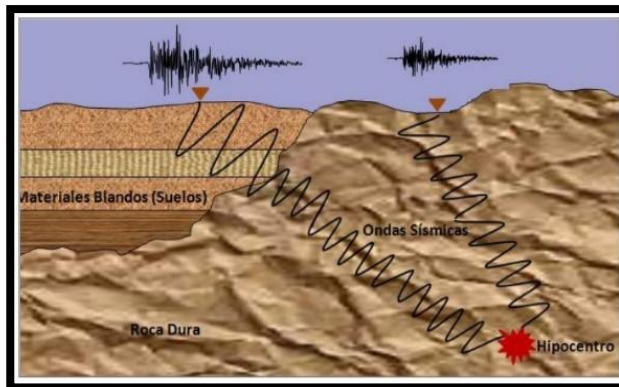
El efecto de sitio es un concepto importante en la determinación de la intensidad del movimiento sísmico y fue reconocido desde principios de la sismología y documentado por los japoneses en el siglo XVIII después de la ocurrencia de un movimiento sísmico. Los daños que se producen ante la ocurrencia de un terremoto sobre las estructuras, está influido por la respuesta del terreno. De modo esquemático podemos decir que, al comparar el movimiento de una roca dura, el cual es constante en un rango de frecuencia, con el movimiento de un suelo blando a las mismas frecuencias, el movimiento se amplifica de manera muy relevante con respecto a la roca. Esto produce un prolongamiento en el periodo de vibración modificando su contenido de frecuencia, como se verá en la Figura 1.

“El movimiento del terreno debido a un sismo en un punto dado depende naturalmente de los parámetros asociados a la fuente sísmica y de la atenuación de la energía sísmica conforme se propaga desde la fuente al sitio de interés” (Chávez et al., 2014, p.8).

Cerca de la superficie, respecto al subsuelo, las densidades de los materiales no cambian mucho. A diferencia, en un depósito de espesor considerablemente grande y blando o sedimentario, el factor de amplificación puede variar hasta más de 2 veces. Al respecto, Chávez et al. (2014) expresa: “La conservación del flujo de energía requiere que una onda

sísmica que pasa de un medio con velocidad de propagación rápida a uno con velocidad más baja aumente su amplitud” (p.8).

Figura 1: Gráfico del efecto de sitio (Carrillo, 2013).



Fuente: Elaboración propia

Una de las fuentes más importantes para el estudio de efecto de sitio son los llamados microtemores los cuales hacen referencia al ruido ambiental producido de manera natural o artificial, pero con el ruido artificial es de tener cuidado porque puede ser poco beneficioso para el estudio. Se ha demostrado que los microtemores están compuestos en su mayoría por ondas superficiales de acuerdo a Bard (1980) y, en cuanto a las fuentes que los producen se sabe que a periodos largos (por debajo de 0.3 a 0.5 Hz) son causados por las ondas oceánicas que ocurren a grandes distancias; a periodos intermedios (entre 0.3- 0.5 Hz y 1 Hz) los microtemores son generados por las olas del mar cercanas a las costas; y para periodos más cortos (frecuencias mayores que 1 Hz.), las fuentes de los microtemores están ligadas a la actividad humana por lo que reflejan los ciclos de esta.

Los microtemores se localizan en el intervalo de frecuencias entre 0.01 a 30 Hz, sin embargo, en la exploración geofísica solo enfoca su interés en el intervalo de 0.1 a 10 Hz. Los que tienen como origen la actividad humana son denominados periodos cortos, menores a un segundo o mayores a 1 Hz en el dominio de las frecuencias. Por otro lado, los microtemores que tienen origen en los fenómenos naturales tales como el clima (el viento,

variaciones atmosféricas), actividad volcánica y condiciones oceánicas, comprenden un periodo dominante mayor a 1 segundo o menores a 1 Hz (bajas frecuencias).

Características de microtemblores para efecto de sitio definidas por Castillo et al. (2017)

- Los microtemblores presentan variación diurna, las amplitudes de los registros obtenidos durante el día se alteran entre 2 y 10 veces más que aquellos que se registran en la noche, es decir, son dependientes de la hora del día en que se realiza su medición, además de la fuente que los genera.
- Las amplitudes de los microtemblores generalmente son muy pequeñas y los desplazamientos del suelo son en el orden de μm , muy por debajo del sentir humano.
- El análisis de los microtemblores se enfoca básicamente en el contenido de las ondas superficiales de Rayleigh.
- Los periodos no varían con respecto al tiempo, el periodo depende de las propiedades dinámicas del suelo, y, por consiguiente, pueden correlacionarse con las condiciones geológicas y geomorfológicas. Por ejemplo, los periodos menores a 0.2 segundos se asocian a suelos firmes, mientras que los periodos mayores a 0.2 segundos son típicos de depósitos más blandos (SESAME European Research Project, 2004).

Método de Nakamura: Fundamentos básicos del método de Nakamura

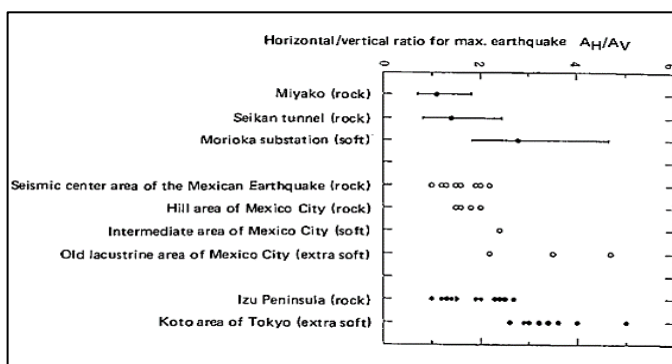
Esta técnica consiste en la determinación de los espectros de Fourier de las componentes horizontales y de la vertical de registros de vibraciones ambientales, obtenidos con un velocímetro o un acelerógrafo triaxial. A partir de ellos se obtiene la razón H/V (razón espectral de la componente horizontal respecto a la vertical para un mismo registro de ruido). Como resultado, la relación espectral (cociente) de las componentes horizontal y vertical de microtemblores se asemeja a la función de transferencia para el movimiento horizontal de las capas superficiales. Es aceptado en el campo científico que una función de transferencia es igual a una deconvolución de señales, cociente de señales, esto nos devuelve información del medio y del comportamiento de la señal cuando atraviesa dicho medio.

La Figura 2 muestra la relación (Amplitud Horizontal /Amplitud Vertical) de los valores máximos entre los movimientos horizontales y verticales del terremoto para cada punto o zona de observación (Nakamura, 1989). Evidentemente, el valor AH/AV (Amplitud

de la componente Horizontal/Amplitud de la componente Vertical) del terremoto está relacionado con las condiciones del suelo del punto de observación y A_H/A_V es cercano a "1" para el suelo firme. Desde este punto de vista, en el suelo compacto no prevalecen cambios amplitud en una dirección específica, siendo los sismos “parejos” en todas las direcciones.

Figura 2

Valores de amplitud en diferentes suelos



Nota: A method for the estimation of dynamic subsurface characteristics using microtremor at the ground surface (Nakamura, 1989).

Función de Transferencia o Deconvolución de señales

Respecto a esto, Mirón et al. (2022) señala que la función de transferencia hace posible la descripción, mediante un modelo matemático, del sistema físico donde se genera, propaga y posteriormente se registran las señales sísmicas mediante tres elementos principales, ver Figura 3:

- Función de entrada $S(t)$: es cualquier forma de excitación del suelo, ya sean sismos o microtremores
- Función de salida $U(t)$: representa la respuesta dinámica del sistema en conjunto, es decir, muestra como la señal original es modificada por el medio de propagación y contiene la información de este
- Función de transferencia $G(t)$: esta es dependiente de los aspectos geológicos por donde se propaga la señal sísmica hasta su registro

Si se conoce la señal de entrada y la señal de salida del sistema es posible recuperar la función de transferencia y determinar las propiedades de medio donde se ha propagado la señal sísmica.

Figura 3 La función de transferencia



Nota: Esquema donde se describe la función de transferencia, así como sus componentes principales para obtener la respuesta dinámica del sitio (Limaymanta 2009).

Función de Transferencia para capas superficiales propuesta por Nakamura

El autor propone que la función de transferencia empírica puede ser aproximada mediante los cocientes espectrales de las componentes horizontales entre la componente vertical registradas en microtremores. Propuesta inicialmente por Nakamura (1989), El autor basa su técnica en la hipótesis que las señales registradas son en casi su totalidad ondas de Rayleigh. Además de la hipótesis anterior y al igual que otras técnicas, también asume la existencia de un medio estratigráfico de suelo blando que cubre un área con suelo duro (o basamento). La función de transferencia AS de las capas superficiales se define generalmente como: $AS = HS/HB$.

HS y HB son, respectivamente, el espectro de microtremor en la superficie y el espectro de microtremor horizontal que incide desde el basamento. Como Nakamura propone que tenemos dos funciones de transferencia que describen las propagaciones de las ondas en un estrato y en la superficie, para tener una función de transferencia más confiable se obtiene el cociente de ambas funciones, descrita por:

$$S_m = \frac{S_e}{A_s} = \frac{\frac{H_s}{H_b}}{\frac{V_s}{V_b}} = \frac{H_s}{V_s} \cdot \frac{V_b}{H_b}$$

Al realizar una serie de ensayos de ruido sísmico, Nakamura (1989) pudo encontrar que (para un amplio rango de frecuencias) en sitios donde existe un substrato firme, la

propagación es aproximadamente igual en todas las direcciones. Por lo tanto, podemos comprobar que:

$$\frac{H_b}{V_b} = 1$$

Por lo que la Función de transferencia libre de efectos de onda Rayleigh, y modificada, se puede calcular solamente a partir de los espectros de Fourier para los microtemores registrados en la superficie. Entonces:

$$S_M = \frac{H_s}{V_s}$$

Metodología para estudio propuesto

La microzonificación sísmica consiste en generar zonas en una determinada región, basándose en criterios científicos, a partir del análisis de ruido sísmico ambiental por medio de la técnica de Nakamura (razón de componentes espectrales). La toma de medidas tiene como objetivo el registro sísmico de microtemores, por medio de ello es posible identificar los suelos con y sin efecto de sitio (Lermo y Chávez, 1994).

Instrumentación

La instrumentación para la toma y el procesado de los registros sísmicos es la siguiente:

- Un sismómetro (todas las componentes: Norte-Sur, Oeste-Este, y Vertical).
- Baterías recargables: para dar energía al sismómetro.
- Computadora portátil: para visualizar el registro en tiempo real.
- Brújula: para alinear el sismómetro en la dirección norte.
- Cables conectores para el sismógrafo Sixaola. (Incluye Antena GPS, conector de energía de 12V, conector Ethernet, conector USB)
- GPS.
- Las mediciones en campo se llevan a cabo por medio de un sismógrafo digital de período corto (4.5 Hz) Sixaola elaborado por el Observatorio Sísmico del Occidente de Panamá. Ver Figura 4.

Instrumentación para registros de microtemores.

Para estimar el efecto de sitio por medio del uso de registros de vibraciones ambientales se utilizará el software Geopsy, para el procesamiento de datos se hará uso de Microsoft Excel, para la representación en mapas se utilizará Surfer®, y Google Earth Pro y Qgis se utilizarán para la realización de mapas con la distribución espacial de los puntos de medida.

Figura 4

Instrumentos



Procedimiento para toma de datos: campaña de campo

Paso 1: Con el uso de programas como Google Earth Pro, se elaboró un mapa de la distribución espacial de los puntos dónde se tomaron las mediciones (Fig. 4).

Figura 5

Grid de mediciones



Paso 2: El visitar los puntos colocados en el mapa para examinar las características físicas de los mismos, permitirá verificar si los puntos son adecuados para realizar las mediciones. Por ejemplo, se debe evitar puntos sobre concreto muy profundo, ubicaciones dentro de edificios o terrenos privados, o zonas en las que haya mucho ruido debido a fuentes antropogénicas, vegetación y tierra suelta que puede ocasionar ruido tal como se indican en los criterios SESAME (Acerra et al., 2004).

Paso 3: Una vez en campo (con el equipo de medida) ubicar el punto de interés y colocar el sismómetro justo sobre él. Realizar las respectivas conexiones de cables y otros dispositivos del equipo (GPS, memoria USB, cable Ethernet).

Paso 4: Este paso es referente a la calibración e instalación. Se debe alinear el equipo con el norte magnético. El equipo tiene una flecha de norte en la parte superior, se debe alinear esta flecha con la aguja de la brújula.

Para realizar la calibración del equipo primero habrá de llevar a cabo todas las conexiones y la alineación al norte. El equipo posee un nivelador de burbuja calibrado en el centro, y tres tornillos ajustables en las direcciones (Este-Oeste-Norte). Para calibrar se deberán ajustar los tornillos de tal forma que se alcance la nivelación mediante el centrado de la burbuja.

Paso 5: Después de realizar el procedimiento de calibración, proseguimos a conectarlo con la batería. Una vez conectado a la fuente de energía se encenderá sismómetro, esto podrá comprobarse por medio del sistema de luces que se encuentra en la parte superior del mismo.

Paso 6: Respecto al tiempo de medida y finalización del registro, se recomienda que el tiempo de medida sea al menos de 40 min (CITA N02) (Acerra et al., 2004). Una vez transcurrido el tiempo establecido se debe desconectar la fuente de energía del equipo, y después se desconectan todos los demás dispositivos.

Paso 7: Al Transferir y organizar las mediciones, los registros obtenidos en la campaña de campo son recopilados en una carpeta general contenedora de cada uno de los resultados en cada punto. Dichos resultados son alojados en subcarpetas que contienen cada

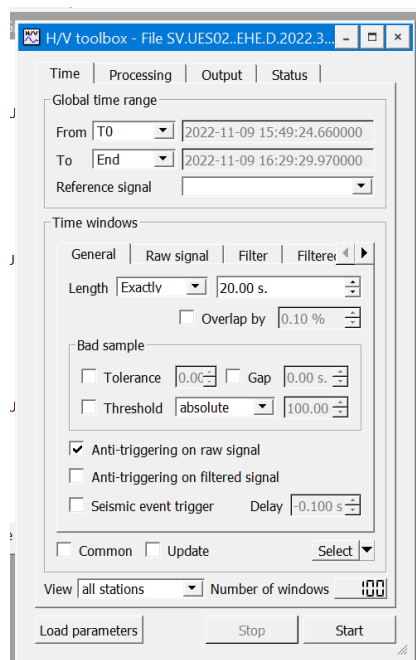
uno de los tres archivos (la extensión del archivo varía según el sismómetro utilizado) correspondientes a las componentes Norte-Sur, Oeste-Este y Vertical.

Procesamiento de datos

En la Figura 4 podemos observar el mallado espacial de la toma de datos, fueron 24 registros de microtemores obtenidos en la ciudad de Santa Ana, específicamente en la colonia El Palmar. A continuación, y el procesado y resultados obtenidos. Los datos fueron procesados en el Programa *Geopsy* en su versión 3.4.1.

Existen diferentes parámetros que son necesario de verificar al momento de abrir el programa, al inicializar el programa nos muestra una ventana que contiene muchos comandos y fichas las cuales se deben verificar, ya que estas vienen por defecto, entre las más importantes están: buscar nuestra la ruta donde tenemos nuestros datos, para esta versión de *Geopsy* es necesario que la carpeta raíz no tenga, como nombre, ningún carácter fuera de las normas , ya que de ser así el programa no podrá leer los archivos, en toda caso de que la carpeta raíz tenas una letra o símbolo fuera de dichas normas deberá cambiársele nombre. De allí los demás parámetros han sido obtenidos del manual creado por SESAME (2004), así que el programa fue preparado correctamente para ser ejecutado, como se verá en la Figura

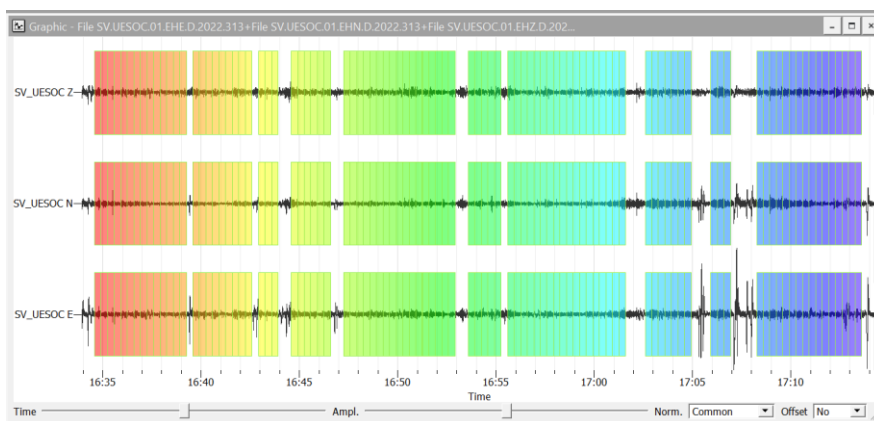
6. **Figura 6** Ventana de *Geopsy*



Fuente: elaboración propia

Una vez hecho eso, el programa calcula la transformada de Fourier y nos da el espectro de Fourier para cada ventana, gracias a la densidad de los espectros de Fourier podemos calcular el periodo predominante para ese punto, su Frecuencia y Amplitud. Así, la Figura 7 nos muestra las ventanas de los registros obtenidos para el punto #1, en esta ventana ya se ha hecho una selección de datos, esto es importante y queda a criterio del autor cuáles amplitudes eliminar, ya que muchas amplitudes fuera del “rango de ruido” pueden ser causadas por fuentes artificiales no locales. La figura 8, por su parte, nos muestra el espectro de las densidades de Fourier, así como la Frecuencia asociada a este punto en específico, punto de medición #1.

Figura 7 Ventanas de mediciones



Fuente: Elaboración propia

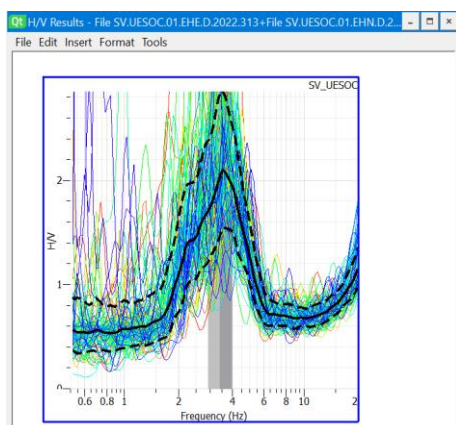
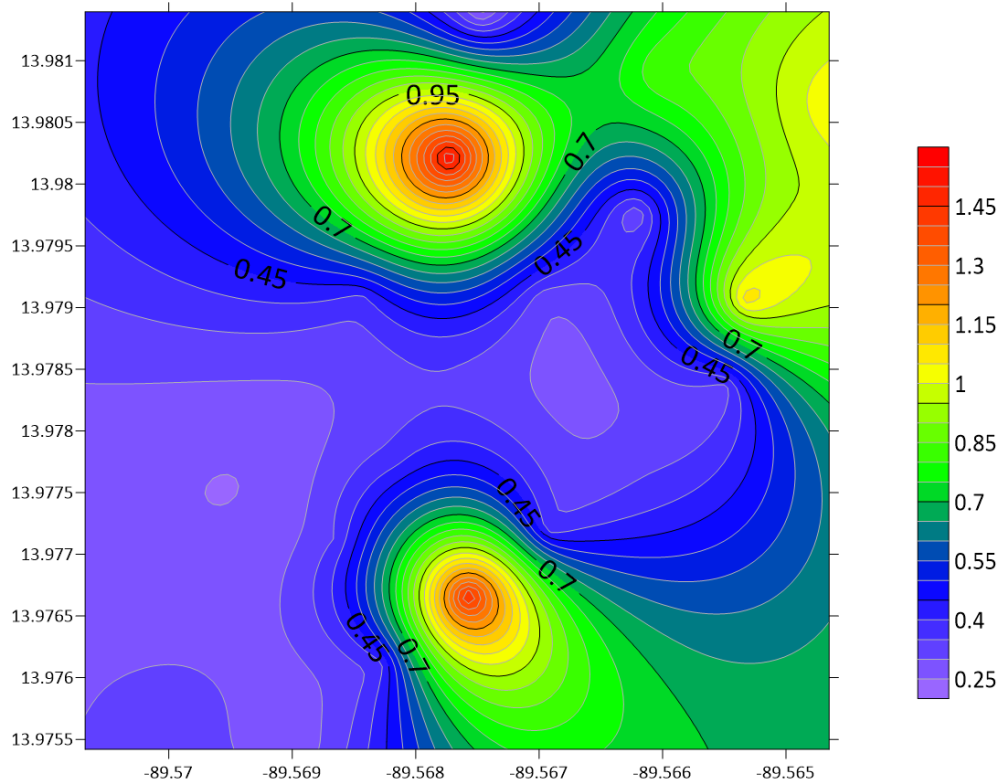


Figura 8 Densidad de espectros de Fourier

Resultados

Finalmente, este proceso se ha hecho para cada punto de registro obtenido, con el fin de obtener periodos predominantes para los 24 puntos, además poder generar un mapa con estos periodos predominantes y poder caracterizar de una mejor manera el comportamiento de los suelos para esos distintos sitios. Por tanto, en la Figura 9 los periodos menores a 4.5 segundos están caracterizados de color azul, mientras que los periodos arriba de 4.5 hasta 1 segundo están de color verde al rojo. El color rojo concentra los periodos más largos, por ende, son las zonas con frecuencias más largas, lo que significa mayor amplitud

Figura 9



Isoperiodos obtenidos, en los ejes las coordenadas

método rápido y sobre todo barato; lo ideal sería poder considerar la no linealidad de los suelos (anisotropía de los suelos) en este método, a pesar de eso, es un buen método.

Recomendaciones

- Para realizar las mediciones debemos asegurarnos del ambiente en el que estamos, que no haya muchos árboles, malezas grandes, ruido artificial muy grande y sobre todo que nuestro instrumento esté bien emplazado y calibrado, ya que todo esto puede afectar los resultados verdaderos de los registros y por ende obtener periodos, frecuencias y amplitudes que no son las reales del suelo.
- El tiempo de medición fue de 40 minutos para cada punto de medición, es recomendable un tiempo considerable porque al momento de procesado se eliminan ventanas con registros y se recude con ello el tiempo los registros a procesar.
- Finalmente, se recomienda ser cuidadoso en las mediciones para finalmente nuestros resultados sean los más correctos posibles, la mejor recomendación sería seguir las recomendaciones del manual hecho por SESAME (2004).

Referencias

SESAME(2024)ScientificResearch

Publishing,<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3081764>

Bard, P. y Bouchon, M. (1980). The seismic response of sediment-filled valleys. Part 1. The case of incident SH waves. *Bulletin of the Seismology Society of America*, 70(4), 1263-1286. <https://doi.org/10.1785/BSSA0700041263>

Castillo, R. y Urrutia, B. (2017) *Microzonificación sísmica en el Centro Histórico de la Zona Metropolitana de San Salvador, El Salvador, Centro América* [Tesis de grado no publicada]. Universidad de El Salvador.

Chávez, F. y Montalva, G. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y Proyectos*, 16, 6-30. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132014000200001>

- Lermo, J. y Chávez F. (1994). Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13, 413-423. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0267-7261(94)90012-4)
- Limaymanta, M. (2009). *Uso de familias espectrales obtenidas con registros de sismos y microtremores para la clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico. Aplicación en las ciudades de Veracruz-Boca del Río, Oaxaca y Acapulco* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mirón, C., Arroyo, E. y Mayen, E. (2022) *Microzonificación sísmica para la Ciudad de Santa Ana, El Salvador* [Tesis de grado no publicada]. Universidad de El Salvador.
- Nakamura, Y. (1989). A method for the estimation of dynamic subsurface characteristics using microtremor at the ground surface. *Quarterly Report of RTRI* 30(1), 25-33. <https://trid.trb.org/View/294184>