

# CONSTRUCCIÓN DE ESPECTROS DE SITIO Y REGIONALES PARA ESTRUCTURAS CONVENCIONALES EN LA CONURBACIÓN VERACRUZ-BOCA DEL RÍO, EMPLEANDO UNA ADAPTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO RECOMENDADO EN EL CDS-MDOC-2015 PARA CONSTRUIR ESPECTROS DE SITIO

*Alejandro Vargas Colorado<sup>(1)</sup>, José E. Barradas Hernández<sup>(1)</sup>, Francisco Williams Linera<sup>(1)</sup>, Regino Leyva Soberanis<sup>(1)</sup>, Roberto Rivera Baizabal<sup>(1)</sup> y Guadalupe Riquer Trujillo<sup>(1)</sup>*

## RESUMEN

El reglamento de construcciones del municipio de Veracruz indica que para realizar el diseño por sismo de estructuras se emplee el CDS-MDOC-2015, el cual especifica usar Espectros Transparentes Regionales (ETRs) para el diseño de Estructuras Convencionales (ECs). Para construir los ETRs, el CDS-MDOC-2015 indica realizar una exploración básica del subsuelo cumpliendo con un conjunto de requisitos que hacen que no sea económicamente factible de realizar para ECs. Por lo anterior, en el presente estudio se propone un procedimiento que resulta de modificar la forma en la que se caracterizan los efectos de sitio en el procedimiento recomendado en el CDS-MDOC-2015 para la construcción de Espectro Específicos de Sitio (EESs). En el procedimiento normativo los efectos de sitio se caracterizan mediante una función de transferencia teórica (FTT), mientras que en el propuesto se caracterizan mediante cocientes espectrales H/V obtenidos de registros de vibración ambiental, cuyo costo es menor que el de una FTT y que la realización de una exploración básica del subsuelo. Por lo anterior, el procedimiento propuesto es factible de aplicar, con ciertas limitaciones, para construir tanto EESs como ETRs para el diseño de ECs. Dicho procedimiento se aplica para construir un ETR en la conurbación Veracruz-Boca del Río, y de su comparación con los ETRs normativos se observó que éstos subestiman las demandas en casi todo el intervalo de periodos.

**Palabras clave:** Espectros transparentes regionales; estructuras convencionales; cocientes espectrales H/V; efectos de sitio

## CONSTRUCTION OF SITE AND REGIONAL SPECTRA FOR CONVENTIONAL STRUCTURES IN THE VERACRUZ-BOCA DEL RÍO CONURBATION, USING AN ADAPTATION OF THE PROCEDURE RECOMMENDED IN CDS-MDOC-2015 TO CONSTRUCT SITE SPECTRA

### ABSTRACT

The construction regulations of the municipality of Veracruz indicate that to carry out the earthquake design of structures use the CDS-MDOC-2015, which specifies using Regional Transparent Spectral

Artículo recibido el 31 de 07 de 21 y aprobado para su publicación el 01 de 12 de 21. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

<sup>(1)</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Av. S.S. Juan Pablo II s/n, Costa Verde, Boca del Río, Veracruz, C.P. 94294.  
[alejvargas@uv.mx](mailto:alejvargas@uv.mx); [erbarradas@uv.mx](mailto:erbarradas@uv.mx); [franciscowilliamslinera@yahoo.com.mx](mailto:franciscowilliamslinera@yahoo.com.mx); [rleyva@uv.mx](mailto:rleyva@uv.mx);  
[rivera@uv.mx](mailto:rivera@uv.mx); [guadaluperiquer@yahoo.com.mx](mailto:guadaluperiquer@yahoo.com.mx)

(ETRs) for the design of conventional structures (ECs). To build the ETRs, the CDS-MDOC-2015 indicates to perform a basic exploration of the subsoil enforcement a set of requirements, that make it not economically feasible to carry out for ECs. Therefore, this study proposes a procedure that results from modifying the way in which site effects are characterized in the procedure recommended in the CDS-MDOC-2015 for the construction of Site-Specific Spectrum (EESs). In the regulatory procedure the site effects are characterized by a theoretical transfer function (FTT), while in the proposed they are characterized by H/V spectral quotients obtained from environmental vibration registers, the cost of which is less than the cost of an FTT and less than the cost of conducting basic subsoil exploration. Therefore, the proposed procedure is feasible to apply, with certain limitations, to build both EESs and ETRs for ECs design. This procedure is applied to construct an ETR in the Veracruz-Boca del Río conurbation, and from its comparison with the normative ETRs it was observed that these underestimates the seismic demands in almost the entire interval of periods.

**Keywords:** Regional transparent spectra; conventional structures; H/V spectral ratios; site effects

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de los reglamentos de construcción municipales de México no contienen normas técnicas para el diseño sísmico de estructuras. Por ello, el Capítulo de Diseño por Sismo del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CDS-MDOC) ha fungido como norma de diseño sísmico no oficial en gran parte de los municipios del país que tienen dicha carencia. El reglamento de construcciones vigente del municipio de Veracruz (RCMV) (GOGEV, 2015) también presenta esta carencia, y para subsanarla, especifica que para realizar el diseño por sismo de estructuras se empleó la versión vigente del CDS-MDOC publicada en 2015. Éste clasifica a las estructuras de acuerdo con su importancia como muy importantes (Grupo A+), importantes (Grupo A) y convencionales (Grupo B). Además, realiza una subclasificación, denominada clase, de acuerdo con el tamaño de las estructuras. Así, por ejemplo, las estructuras convencionales grandes y medianas se clasifican como del grupo B, clase 1 (B1) y las convencionales pequeñas se clasifican como del grupo B, clase 2 (B2). En la zona conurbada de los municipios de Veracruz y Boca del río (ZCVB), como en la mayoría de los municipios del país, la mayor parte de las estructuras se pueden clasificar como B1 y B2, y algunas de ellas son casas habitación, edificios de viviendas, oficinas y comercios.

El CDS-MDOC-2015 recomienda que para el diseño por sismo de estructuras B1 y B2 se empleen, respectivamente, los denominados Espectro Transparente Regional (ETR) y Espectro de Aceleración Constante (EAC). Para construir un ETR se requiere realizar una exploración básica del depósito de suelo conforme a los lineamientos de la sección 3.1.5.2. del CDS-MDOC-2015, para obtener tres de sus parámetros dinámicos: periodo de vibrar predominante, velocidad promedio de ondas de corte ( $V_s$ ) y espesor hasta un estrato lo suficientemente firme (con  $V_s \geq 720$  m/s) o 30 metros de profundidad, lo que se presente primero. Con estos parámetros se clasifica el terreno de desplante como tipo I, II o III, y a partir de dicha clasificación se obtiene el correspondiente ETR. El costo de la exploración básica del subsuelo incrementa significativamente el costo total del proyecto de estructuras del grupo B, por lo que, en la práctica profesional, dicha exploración comúnmente no se realiza con apego estricto a los lineamientos mencionados con la finalidad de reducir su costo. Esto puede resultar en una clasificación errónea del tipo de terreno y, por lo tanto, usar un ETR incorrecto.

En el CDS-MDOC-2015 se menciona que los ETRs son conservadores, ya que se busca proteger a todas las estructuras desplantadas en todos los sitios cuya clasificación corresponda al tipo de terreno determinado. El considerable ancho de las mesetas de los ETRs sugiere que cada tipo de terreno (I, II y III)

incluye varios de tipos de suelo. En el CDS-MDOC-2015 también se menciona que el EAC es aún más conservador, por lo que los autores del presente estudio consideran conveniente que las estructuras B2 se diseñen con los ETRs. Con la finalidad de estudiar el grado de conservadurismo de los ETRs y del EAC especificados en el CDS-MDOC-2015 para la ZCVB, los autores del presente estudio realizaron investigaciones preliminares (Rodríguez, 2020), (Caporal, 2020) en las aplicaron una metodología similar a la que posteriormente se describirá, para obtener espectros de diseño a partir del peligro sísmico en roca especificado en el CDS-MDOC-2015 para estructuras convencionales ubicadas en la ZCVB, y considerando los efectos de sitio en los suelos locales. Los espectros así obtenidos son, al igual que los ETRs, Espectros de Peligro Uniforme (EPU), lo cual permite comparar apropiadamente las ordenadas de ambos espectros en el intervalo completo de periodos estructurales. De la comparación de los espectros normativos y los obtenidos en dichos estudios se observó que, para periodos estructurales muy cortos y cortos los ETRs normativos pueden subestimar las demandas sísmicas, mientras que para periodos estructurales medianos y largos pueden sobrestimar dichas demandas. También se observó que el EAC normativo puede ser conservador para el intervalo completo de periodos estructurales. Si los espectros normativos subestiman las demandas sísmicas, las estructuras diseñadas con ellos pueden tener un nivel de seguridad menor que el establecido en el CDS-MDOC-2015, lo cual no es deseable. Por otra parte, si los espectros normativos sobrestiman las demandas sísmicas, las estructuras diseñadas con ellos pueden tener un nivel de seguridad mayor que el establecido en el CDS-MDOC-2015, sin embargo, su costo será mayor que el necesario, lo cual económicamente tampoco es deseable.

Es posible que la problemática previamente discutida y observada en la ZCVB, también se presente en municipios donde en la práctica profesional se adopte al CDS-MDOC-2015 como norma de diseño sísmico oficial o no oficial, por lo que esta problemática podría ser de competencia nacional. Es importante mencionar que los autores del presente estudio no encontraron investigaciones documentadas en las que, mediante la comparación de EPU obtenidos de la forma anteriormente mencionada con los correspondientes ETRs normativos, se haya investigado el grado de conservadurismo de estos últimos. Se debe aclarar que para que esta comparación sea apropiada en el intervalo completo de periodos estructurales, los espectros obtenidos deben ser EPU y no espectros de respuesta correspondientes a acelerogramas registrados durante sismos. Los resultados de estos estudios serían útiles para conocer mejor la problemática discutida a nivel nacional.

Por otra parte, en el CDS-MDOC-2015 se recomienda que para obtener estimaciones racionales de las demandas sísmicas para el diseño de estructuras del grupo B, se puede construir el denominado Espectro Específico de Sitio (EES) conforme a los lineamientos y criterios especificados en la sección 3.1.6.1. de dicho manual. Sin embargo, para construir un EES se debe realizar una exploración detallada del subsuelo conforme a los lineamientos establecidos en la sección 3.1.5.1, lo que hace que dicha exploración sea mucho más costosa que la exploración básica y, por lo tanto, que no sea económicamente factible efectuarla para la mayoría de las estructuras del grupo B. Además, en el CDS-MDOC-2015 se recomiendan unos criterios simplificados para considerar las incertidumbres en las propiedades del suelo y en el periodo estructural para la construcción de EESs, que consisten esencialmente en modificar únicamente el espectro elástico solo en la región de respuesta máxima. Los autores del presente estudio consideran que dichos criterios deben mejorarse considerando ambos tipos de incertidumbres en el intervalo completo de periodos estructurales, de al menos el espectro elástico.

Considerando los diversos aspectos mencionados anteriormente, es necesario que tanto el RCMV como los reglamentos de otros en municipios en los que se adopte al CDS-MDOC-2015 como norma de diseño sísmico oficial, modifiquen las especificaciones del CDS-MDOC-2015 relacionadas con la construcción de los ETRs, o bien, desarrollen una norma de diseño sísmico propia en la que al menos se especifiquen los ETRs. En ambos casos los ETRs deben ser construidos a partir de la consideración de los

efectos de sitio en los tipos de suelos locales exclusivamente. Además, para obtener demandas de diseño que serán aún más racionales que las proporcionadas por los ETRs, es recomendable que dichas normas también especifiquen un procedimiento para la construcción de EESs para el diseño de estructuras con importancia convencional; que tenga las siguientes características deseables: (1) que la técnica empleada para la caracterización de los efectos de sitio del subsuelo tenga un costo menor que la exploración básica para clasificar el tipo de terreno, especificada en el CDS-MDOC-2015, (2) que los efectos de sitio se estimen racionalmente en el intervalo completo de periodos estructurales de interés en ingeniería sísmica, por medio de una función de transferencia.

Con la finalidad de cubrir las necesidades previamente mencionadas, en el presente estudio se propone un procedimiento para construir tanto EESs como ETRs para estructuras convencionales, que resulta de modificar la forma en la que se caracterizan los efectos de sitio en el procedimiento recomendado en la sección 3.1.6.1. del CDS-MDOC-2015 para la construcción de EESs para estructuras importantes. En el procedimiento normativo, la forma más común de caracterizar los efectos de sitio es mediante la denominada función de transferencia teórica (FTT), mientras que en el procedimiento propuesto dichos efectos se caracterizan mediante cocientes espectrales H/V obtenidos de registros de vibración ambiental. La obtención de dichos cocientes es más económica que la obtención de una FTT y que la realización de una exploración básica del subsuelo, por lo que el procedimiento propuesto es económicamente factible de aplicar, con ciertas limitaciones que se mencionarán posteriormente, para construir tanto EESs como ETRs para un determinado tipo de suelo, para el diseño de estructuras convencionales. El procedimiento se aplica para construir el ETR para uno de los tres principales tipos de suelo identificados en la ZCVB debido a que, como se mostrará posteriormente, se dispone de la información requerida. Sin embargo, se puede aplicar en cualquier sitio específico o región del país donde se disponga de dicha información. Con la aplicación del procedimiento propuesto se espera que las estructuras convencionales diseñadas con los espectros obtenidos tengan un nivel de seguridad similar al establecido en el CDS-MDOC-2015 en el intervalo completo de periodos estructurales. Es importante mencionar que las estructuras de importancia convencional representan un porcentaje muy significativo de las existentes tanto en la ZCVB, como en la mayoría de las ciudades del país.

## RESEÑA DE TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE EFECTOS DE SITIO

Se dispone de varias técnicas para calcular los efectos de sitio en depósitos de suelo, las cuales se pueden clasificar en dos tipos: experimentales y teórica. En el primer tipo se incluyen procedimientos de análisis espectral de registros de vibración ambiental y registros de sismos. En el segundo tipo se encuentra el procedimiento de modelado y análisis de los depósitos de suelo.

### Técnica de los cocientes espectrales estándar

Denominada con el acrónimo SSR por sus siglas en inglés (Standar Spectral Ratio) (Borcherdt, 1970). Esta técnica consiste en calcular el cociente entre los espectros de Fourier de las componentes horizontales de un sismo registrado en una estación localizada en suelo, y los espectros de Fourier de las correspondientes componentes del mismo sismo registrado en otro sitio en roca o con un suelo lo suficientemente firme, tomado como referencia. Algunas veces es posible construir pozos en el mismo sitio donde se registran los sismos en suelo, hasta una profundidad donde exista un estrato de roca o de suelo lo suficientemente firme, colocar un acelerómetro y registrar los sismos. En este caso el estrato firme se toma como el sitio de referencia. A cada uno de los cocientes obtenidos se les conoce como función de transferencia empírica (FTE) y éstas permiten estimar, en función de la frecuencia, las amplificaciones del movimiento en el suelo respecto al movimiento en roca. Esta técnica es con la que mejor se caracterizan los efectos de sitio, sin embargo, su aplicación tiene los siguientes principales inconvenientes: (1)

frecuentemente en el sitio de interés no se dispone de una estación temporal o permanente en la que se hayan registrado sismos, y el tiempo de espera para registrarlos es incierto. (2) Como se mencionó, se requiere necesariamente de una estación de referencia cuyo suelo sea roca o al menos lo suficientemente firme, características que no siempre presentan los suelos de la región en la que se ubica el sitio de interés. (3) De acuerdo con (Ordaz y Veras, 2003), las FTEs obtenidas de diferentes sismos varían entre ellas, ya que dependen de las características propias de los sismos. Por lo anterior, se deben obtener FTEs para un número suficiente de sismos con el propósito de muestrear adecuadamente las características de todos los sismos que puedan actuar en el sitio de interés.

### **Técnica de Nakamura con registros de vibración o ruido ambiental**

Algunas veces denominada con el acrónimo HVNSR por sus siglas en inglés (Horizontal to Vertical Noise Spectral Ratio) (Nakamura, 1989). Esta técnica consiste en calcular el cociente entre los espectros de Fourier de ambas componentes horizontales de un registro de vibración ambiental obtenido en una estación localizada en suelo, y el espectro de Fourier de la componente vertical del mismo registro obtenido en el mismo sitio. A cada uno de estos cocientes se les conoce como cociente espectral H/V y con base en los resultados obtenidos en una investigación posterior (Nakamura, 2000), este autor demostró que dichos cocientes pueden ser usados como un estimador aproximado de los efectos de sitio para las ondas internas (relación entre el espectro de Fourier de la componente horizontal del movimiento en superficie y el espectro de Fourier de la componente horizontal del movimiento en la frontera de un semiespacio de roca firme debajo del estrato de suelo). En vista de este resultado, algunos autores (Robles y Jiménez, 2017) consideran al cociente espectral H/V como una aproximación de la función de transferencia de un depósito de suelo. Esta es la técnica experimental más factible de aplicar en la práctica, ya que obtener uno o incluso varios registros de vibración ambiental es relativamente rápido y solo se requiere hacerlo en el sitio de interés. Sin embargo, debido a las inconvenientes que tiene, los cuales se discuten a continuación, en la práctica profesional en México comúnmente se ha aplicado solo para estimar la frecuencia predominante de un depósito de suelo.

El HVNSR generalmente presenta un pico máximo que puede presentar diferentes grados de agudeza. La abscisa de este pico es la frecuencia predominante del depósito de suelo y su correspondiente amplitud se puede interpretar como una medida de la amplificación relativa máxima del movimiento en el suelo. En general, cuanto mayor sea el contraste de impedancias entre el depósito de suelo y el basamento rocoso, más agudo será el pico máximo. Para depósitos de suelos blandos y uniformes los picos máximos del HVNSR serán agudos (de amplitud significativa y angostos) y conforme se incrementa la firmeza del suelo los picos máximos serán gradualmente de menor amplitud y más anchos. Para suelos firmes frecuentemente no es posible distinguir un pico en el HVNSR, lo cual no permite identificar la frecuencia predominante. También, cuando las propiedades del depósito de suelo varían en las direcciones horizontales o cuando la estructura del subsuelo es compleja, los HVNSR presentan algunos picos de amplitudes similares en una banda ancha de frecuencias, lo cual dificulta identificar la frecuencia predominante. En estas condiciones no es conveniente aplicar la técnica de los HVNSRs, y para determinar si los depósitos de suelo tienen una frecuencia predominante, se deberá aplicar alguna de las otras técnicas mencionadas en esta sección. En resumen, actualmente se reconoce que los NHVSRs obtenidos con registros de vibración ambiental proporcionan estimaciones confiables de la frecuencia predominante de un depósito de suelo, siempre que el pico máximo se distinga claramente. Aplica lo mismo para los picos correspondientes a las restantes frecuencias características, en caso de que existan.

La discusión previa se enfocó en las condiciones en las que la técnica de los HVNSRs puede emplearse o no para estimar las frecuencias características de un depósito de suelo. Sin embargo, si un cociente HVNSR se pretende emplear como una función de transferencia, es deseable además que pueda

estimar adecuadamente las amplitudes relativas en el intervalo completo de frecuencias de interés. Ha existido una discusión sobre si con la aplicación de esta técnica también es posible estimar adecuadamente las amplitudes relativas del movimiento en el suelo. Algunas investigaciones han presentado evidencia a favor (Lermo et al., 1991; Lermo y Chávez-García, 1994) y otras en contra (Gutiérrez y Singh, 1992). En un estudio extenso realizado en Europa denominado proyecto SESAME (SESAME, European Research Project, 2004), se observó que las amplitudes de los HVNSRs son, en general, menores (y en muchos casos significativamente), que las amplitudes obtenidas con la técnica SSR. Este resultado apoya más la evidencia que indica que otro inconveniente de la técnica de los HVNSRs es que, en general, mediante su aplicación se subestiman las amplitudes relativas del movimiento en el suelo. Para combinar las componentes horizontales de los registros de vibración ambiental para el cálculo del NHVSR, comúnmente se han empleado dos métodos muy conocidos: la media cuadrática (la raíz cuadrada de la media geométrica de los cuadrados) y la media geométrica (SESAME, European Research Project, 2004). (Martínez, 2015) presenta un método alternativo desarrollado por (Sánchez-Sesma et al., 2011) para combinar las componentes horizontales y obtener el NHVSR, con cuya aplicación se busca subsanar el inconveniente mencionado de la técnica de los NHVSRs. Este método se denomina método de las densidades espectrales direccionales (MDEDs), y se aplica mediante la ec.1.

$$[H/V] = \sqrt{\frac{E_1 + E_2}{E_3}} \quad (1)$$

Donde  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$  son las densidades espectrales direccionales (DEDs), las cuales son el cuadrado del espectro de amplitudes de Fourier de las componentes de un registro. Los subíndices 1 y 2 se refieren a las componentes horizontales del registro y el subíndice 3 a su componente vertical.

Para validar el MDEDs, (Martínez, 2015) comparó las amplitudes relativas del HVNSR obtenidas con dicho método, con las obtenidas mediante las técnicas SSR y cocientes espectrales H/V obtenidos con registros de sismos en varias estaciones localizadas principalmente en la Ciudad de México y en los estados de Puebla, Tlaxcala y Chiapas. De dicha comparación se observó que, en la mayoría de los sitios, los tres tipos de cocientes espectrales fueron más o menos similares en forma. En algunos intervalos de frecuencias las amplitudes de los HVNSRs son menores que las obtenidas con las otras dos técnicas y en otros intervalos ocurre lo contrario. También se observó que en los intervalos en los que las amplitudes de los HVNSRs son menores que las obtenidas con las otras dos técnicas, las primeras amplitudes son, en general, desde 20% hasta 200% menores que las segundas. Aunque los resultados observados por (Martínez, 2015) son satisfactorios, los autores del presente estudio consideran conveniente continuar realizando investigaciones para subsanar de forma aún más satisfactoria el inconveniente mencionado de la aplicación de la técnica HVNSR.

Por otra parte, existen suelos que presentan comportamiento no lineal durante sismos que les inducen demandas sísmicas de moderada y gran intensidad. Debido a que las amplitudes de las vibraciones ambientales son pequeñas, no es de esperarse que la técnica HVNSR sea adecuada tanto para inferir la posibilidad de este comportamiento como para estimar adecuadamente los efectos de sitio cuando el suelo se sujete a dichas demandas sísmicas. En este caso, se deberán aplicar la primera técnica o la tercera descrita en esta sección empleando sismos fuertes, o bien, se deberán determinar experimentalmente un conjunto de parámetros que definen el comportamiento no lineal del suelo, los cuales se emplean en la última técnica descrita en esta sección.

### **Técnica de Nakamura con registros de sismos**

Algunas veces denominada con el acrónimo HVESR por sus siglas en inglés (Horizontal to Vertical Earthquake Spectral Ratio). Esta técnica consiste en calcular el cociente entre los espectros de Fourier de ambas componentes horizontales de un sismo registrado en una estación localizada en suelo, y el espectro de Fourier de la componente vertical del mismo sismo registrado en el mismo sitio. A cada uno de los cocientes obtenidos también se les conoce como cociente espectral H/V. De acuerdo con Martínez et al., 2015, los sismos excitan capas más profundas del subsuelo que las vibraciones ambientales, por lo que los HVESRs ofrecen más información de la disposición estratigráfica del medio, lo cual se ve reflejado en su forma espectral. Debido a esto, se considera que los HVESRs caracterizan mejor los efectos de sitio que los HVNSRs. Sin embargo, la aplicación esta técnica también tiene dos de los inconvenientes que tiene la técnica SSR: (1) frecuentemente en el sitio de interés no se dispone de una estación temporal o permanente en la que se hayan registrado sismos, y el tiempo de espera para registrarlos es incierto. (2) Es de esperarse que se deben obtener HVNSRs para un número suficiente de sismos con el propósito de muestrear adecuadamente las características de todos los sismos que puedan actuar en el sitio de interés.

### **Técnica de modelado y análisis unidimensional de los depósitos de suelo**

Consiste en modelar un depósito de suelo considerando que es un medio elástico con estratificación horizontal de extensión infinita (modelo unidimensional) apoyado sobre un basamento rocoso. Para cada uno de los estratos se requiere estimar, por medio de pruebas geotécnicas y/o geofísicas, las siguientes propiedades: espesor, velocidad de ondas de corte, densidad de masa y amortiguamiento. Del análisis del modelo estratificado del subsuelo ante la incidencia de ondas de corte que se propagan verticalmente, se obtiene la denominada función de transferencia teórica (FTT), la cual permite estimar, en función de la frecuencia, las amplificaciones del movimiento en el suelo respecto al movimiento en el basamento de roca. Esta técnica se aplica cuando no es posible aplicar las técnicas HVESR o SSR, sin embargo, tiene los siguientes inconvenientes: (1) Para conocer las propiedades requeridas de cada uno de los estratos del suelo y la profundidad a la que se ubica el basamento rocoso o al menos un estrato de suelo lo suficientemente firme, es necesario realizar una exploración detallada del subsuelo, la cual frecuentemente es costosa, (2) (Sánchez-Sesma y Singh, 1986), citados en (Martínez, 2015), mencionan que con la aplicación de esta técnica rigurosamente no se obtiene una representación fiel del comportamiento del terreno, (3) No es posible aplicar esta técnica cuando existe efectos bidimensionales o tridimensionales en el depósito del suelo.

## **GEOLOGÍA Y MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA ZCVB**

La región que comprende a la ZCVB está conformada principalmente de cinco depósitos geológicos: Areniscas y conglomerados, de Coral, de playa, de dunas y aluviales (Williams et al., 2007). Desde el punto de vista morfológico, se diferencian tres zonas principales: depósito de playa con una ligera pendiente hacia el mar, depósito de médanos que son formaciones con eje longitudinal en la dirección norte-noreste y la de depósitos aluviales, que se ubica en la parte baja de la ciudad, por detrás del cordón de dunas.

Los autores del presente estudio implementaron desde 2001 una red de monitoreo sísmico local en la ZCVB, la cual es operada por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana (Williams et al., 2003). Con los registros obtenidos en varios sitios se han aplicado las técnicas de cocientes espectrales H/V con registros de vibración ambiental y de sismos para caracterizar los efectos de sitio de los depósitos de suelo. Los datos obtenidos también permitieron realizar una microzonificación sísmica de la ZCVB (Riquer

et al., 2003), en la que se identificaron tres tipos principales de suelos denominados como muy densos, dunas y aluviales. En la fig. 1 se muestra el mapa con dicha microzonificación.

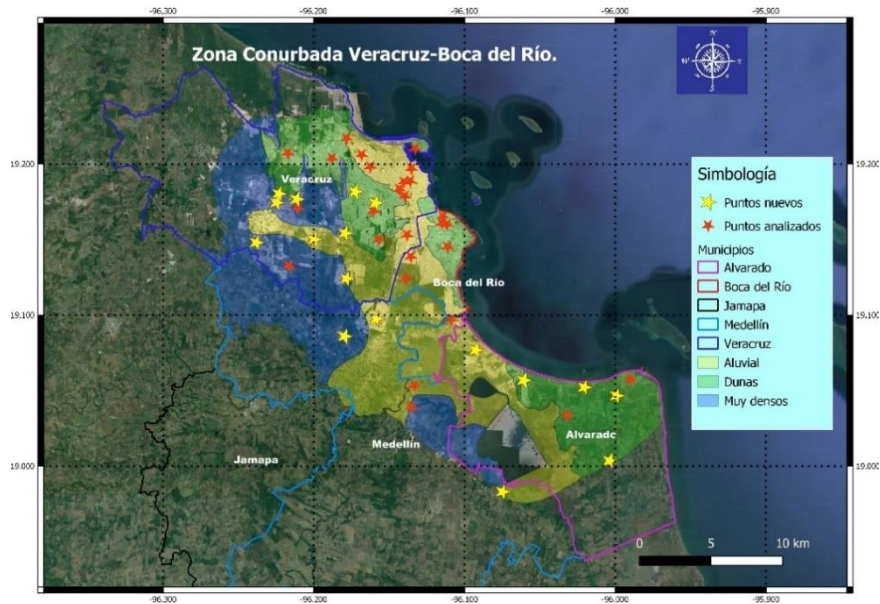


Figura 1. Mapa que muestra la microzonificación sísmica de la ZCVB, así como los sitios donde se obtuvieron los registros de vibración ambiental empleados en el presente estudio.

### FUNCIONES DE AJUSTE DE AMPLITUDES RELATIVAS DE LOS HVNSRs

Anteriormente se mencionó que un inconveniente de la técnica de los HVNSRs implementada con el MDEDs es que, mediante su aplicación, en general, se subestiman desde un 20% hasta un 200% las amplitudes relativas del movimiento en el suelo en algunos intervalos de frecuencias. Con el propósito de subsanar satisfactoriamente dicho inconveniente, en el presente estudio, el HVNSR obtenido con un método similar al MDEDs en un sitio dado de la ZCVB, cuyo suelo es de un determinado tipo de los identificados en dicha zona; se multiplica por la denominada función de ajuste de amplitudes relativas (FAAR), de tal forma que las amplitudes resultantes sean similares al promedio de las amplitudes de los HVESRs registrados en un conjunto de sitios cuyo suelo es del mismo tipo. El concepto de la FAAR es el mismo que el de la Earthquake HV/Microtremor HV Ratio (EMR), propuesta por (Kawase et al., 2018), solo que estos autores usaron la EMR para realizar un proceso de inversión y obtener el correspondiente modelo matemático de los depósitos de suelo.

Como se mostrará posteriormente, las FAARs se emplearán en el procedimiento propuesto en el presente estudio para calcular EESs para el diseño de estructuras de importancia convencional. Si en la región o municipio en el que se ubica el sitio de interés, existe una red local de monitoreo sísmico y se dispone de una microzonificación sísmica en la que se tengan identificados los principales tipos de suelo existentes, es posible calcular fácilmente las FAARs. En caso de que no se disponga de una red local, los municipios podrían adquirir los equipos para crearla y solicitar el apoyo de alguna universidad o asociación profesional locales para que éstas capaciten al personal del municipio para que operen la red. De forma alterna, los municipios pueden establecer convenios con dichas universidades o asociaciones profesionales, para la adquisición del equipo y la operación de la red.



A continuación, se describe el procedimiento para calcular las FAARs para cada uno de los tres tipos de suelo de la ZCVB. Se calcula una FAAR por cada tipo de suelo debido a que sus propiedades dinámicas son diferentes. Primero, para cada uno de los sitios en los que se dispone de registros de algunos sismos seleccionados y registros de vibración ambiental, se calculan los HVESRs y los HVNSRs. En suelos muy densos se ubica solo una estación de registro permanente denominada “POVE”. En suelo de dunas se han ubicado cinco estaciones temporales denominadas “ALVE”, “IIVE”, “ICAVE”, “COVE” y “FIVE”. En suelos aluviales se han ubicado cuatro estaciones temporales denominadas “CUVE”, “CHVE”, “FWVE” y “UCVE”. Se utilizaron 70 sismos registrados mediante la red de monitoreo sísmico local, provenientes de diferentes fuentes sísmicas, los cuales han inducido aceleraciones en el suelo que varían desde una mínima de aproximadamente 3 cm/s<sup>2</sup> hasta la máxima registrada de aproximadamente 15 cm/s<sup>2</sup>. El límite inferior del intervalo de aceleraciones se debe a que se buscó garantizar que en el segmento del acelerograma que corresponde al paso de las ondas de corte, las ondas estuvieran claramente registradas. De acuerdo con (Kawase et al., 2018), si la máxima aceleración del registro sísmico es menor que 1.0 cm/s<sup>2</sup>, las ondas de corte pueden no estar claramente registradas. El criterio de considerar diferentes fuentes sísmicas se estableció para tomar en cuenta el contenido de frecuencias de sismos provenientes de diversas fuentes. En la tabla 1 se muestra la información de la mayor parte de los sismos considerados.

Tabla 1. Listado e información de los sismos considerados

Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud (de acuerdo con el SSN)	Zona
09/07/2001	08:46:42	19.24	96.28	25	3.7	Costa Norte Veracruz
02/08/2001	18:19:07	15.45	94	33	4.5	Costa de Chiapas
03/09/2001	22:26:28	16.12	98.39	6	5.2	Costa de Guerrero-Oaxaca
08/09/2001	02:55:45	16.59	94.95	100	4.8	Istmo de Tehuantepec
07/10/2001	21:39:20	17.01	100.1	16	6.1	Guerrero
09/10/2001	12:48:21	18.17	95.26	58	4.7	Sur de Veracruz
10/11/2001	11:09:15	15.66	98.35	18	6	Costa de Oaxaca
28/11/2001	08:32:36	15.39	93.53	70	6	Costa de Chiapas
16/01/2002	05:09:56	15.58	93.6	36	6.3	Costa de Chiapas
30/01/2002	02:42:03	18.21	96.02	115	5.1	Veracruz-Oaxaca
29/12/2002	01:31:46	17.6	95.19	131	4.7	Veracruz-Oaxaca
21/01/2003	20:06:31	18.22	104.6	10	7.6	Costa de Colima
24/05/2003	11:16:32	19.11	95.87	26	4.1	Costa de Veracruz
13/10/2003	21:32:47	19.04	96.41	16	3.9	Costa de Veracruz
01/01/2004	17:31:50	17.39	101.37	10	6.3	Costa de Guerrero
13/01/2004	13:50:20	16.01	97.3	3	5.1	Oaxaca
17/01/2004	15:13:09	17.68	95.66	109	4.7	Veracruz-Oaxaca
14/06/2004	17:45:23	16.03	97.84	10	5.8	Oaxaca
07/08/2004	06:49:12	17.1	95.48	106	5.3	Matías Romero, Oax.
18/08/2004	04:03:10	16.33	95.14	66	5.7	San Blas Atempa, Oax.
13/08/2005	21:51:56	15.94	97.93	9	5.8	Pinotepa Nacional Oax.
24/09/2005	20:14:02	17.88	97.03	104	4.7	Oaxaca
13/04/2007	06:42:22	17.09	100.44	41	6.3	Atoyac de Alvarez, Gro.
23/05/2007	19:09:14	21.92	-96.16	16	5.2	Tuxpan de Rgz. Cano, Ver.
06/07/2007	01:09:19	16.9	-94.1	100	6.2	Cintalapa, Chis.
23/01/2008	05:49:25	13.78	-93.86	0	5.8	Ciudad Hidalgo, Chis.
17/02/2008	07:10:45	16.24	-98.47	21	4.4	Pinotepa Nacional, Oax.
01/03/2008	04:44:15	16.87	-100.2	9	4.8	Coyuca de Benítez, Gro.
08/03/2008	16:24:17	17.22	-94.81	137	4.5	Matías Romero, Oax.
16/03/2008	08:04:02	17.9	-94.75	98	4.4	Jáltipan de Morelos, Ver
15/04/2008	03:03:06	13.27	-91.04	40	6.5	Ciudad Hidalgo, Chis.
17/04/2008	01:52:59	15.45	-93.52	95	5.4	Pijijiapan, Chis.
28/04/2008	00:06:29	18.05	-100.01	52	5.6	Teloloapan, Gro.
04/05/2008	10:21:35	15.41	-96.75	10	4.5	San Pedro Pochutla, Oax.
17/05/2008	20:04:08	16.18	-98.06	40	4.8	Pinotepa Nacional, Oax.
05/06/2008	05:11:26	15.76	-93.74	99	4.8	Tonalá, Chis.
27/06/2008	02:33:03	19.4	-95.91	22	4	Veracruz, Ver.

Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud (de acuerdo con el SSN)	Zona
08/09/2009	05:14:31	17.68	-95.77	102	5.1	Isla, Ver.
<b>29/10/2009</b>	<b>10:52:57</b>	<b>18.89</b>	<b>-95.81</b>	<b>13</b>	<b>5.5</b>	<b>Alvarado, Ver.</b>
19/02/2010	02:49:47	19.04	-95.65	16	4.3	Alvarado, Ver.
17/08/2010	06:56:00	16.19	-98.02	5	4.2	Pinotepa Nacional, Oax.
19/08/2010	08:49:26	17.63	-94.77	154	4.7	Sayula de alemán, Ver.
14/09/2010	23:32:01	21.43	-106.07	10	5.6	Valle Hidalgo, Nay.
15/09/2010	06:05:46	15.59	-93.52	95	5.1	Pijijiapan, Chis.
21/09/2010	14:42:09	15.73	-95.19	17	5	Salina Cruz, Oax.
01/11/2010	23:16:49	16.68	-93.9	124	5	Cintalapa, Chis.
24/11/2010	14:01:12	15.72	-98.89	14	4.8	Pinotepa Nacional, Oax.
26/11/2010	22:13:49	16.13	-95.91	20	4.5	Crucecita, Oax.
06/01/2013	18:24:44	16.87	-95.02	55	5	Matías Romero, Oax.
15/01/2013	13:09:34	16.3	-98.08	11	4.1	Pinotepa Nacional, Oax.
04/02/2013	05:38:55	15.92	-97.01	23	4.5	Puerto Escondido, Oax.
20/02/2013	21:23:11	18.6	-104.04	5	5.6	Cd. de Armería, Col.
08/03/2013	04:21:46	17.49	-94.99	142	4.1	Sayula de Alemán, Ver.
12/03/2013	03:46:32	15.77	-94.08	66	4.9	Tonalá, Chis.
16/03/2013	10:25:23	16.67	-98.65	22	4.6	Ometepec, Gro.
25/03/2013	23:02:13	14.35	-90.81	198	6.2	Cd. Hidalgo, Chis.
26/03/2013	13:04:45	15.78	-98.61	10	5.4	Pinotepa Nacional, Oax.
05/04/2013	01:58:48	17.08	-100.82	17	5.3	Tecpán, Gro.
12/04/2013	03:45:09	17.78	-101.58	35	5.2	Zihuatanejo, Gro.
20/04/2013	05:19:41	16.02	-98.64	10	4.3	Pinotepa Nacional, Oax.
22/04/2013	01:16:34	17.87	-102.19	10	5.8	Cd. Lázaro Cárdenas, Mich.
12/05/2013	07:30:03	13.69	-91.47	88	5.3	Cd. Hidalgo, Chis.
21/05/2013	08:41:16	15.66	-92.7	164	4.7	Mapastepec, Chis.
02/06/2013	19:13:32	17.84	-100.84	54	4.6	Petatlán, Gro.
16/06/2013	05:19:03	18.04	-99.25	60	5.8	Cd. de Huizucó, Gro.
30/07/2013	13:29:58	15.5	-93.33	105	5.4	Pijijiapan, Chis.
02/08/2013	09:29:46	16.36	-94.76	77	5	Unión Hidalgo, Oax.
06/08/2013	05:57:43	14.18	-91.6	61	5.7	Cd. Hidalgo, Chis.
06/08/2013	20:17:30	16.49	-98.58	16	4.9	Ometepec, Gro.
13/08/2013	16:50:42	16.56	-98.57	4	5	Ometepec, Gro.
16/08/2013	15:32:59	16.54	-98.59	20	5.1	Ometepec, Gro.
21/08/2013	12:38:30	16.79	-99.56	20	6	San Marcos, Gro.
21/08/2013	13:02:18	16.73	-99.7	11	5	Acapulco, Gro.
03/09/2013	16:14:02	20.25	-96.69	16	4.2	Misantla, Ver.
11/09/2013	09:07:34	18.15	-95.47	125	4.2	Isla, Ver.
26/09/2013	06:46:01	13.85	-93.68	20	5.7	Cd. Hidalgo, Chis.
06/10/2013	14:27:52	16.83	-100.1	10	4.9	Coyuca de Benítez, Gro.
06/10/2013	15:10:56	16.81	-100.11	10	5	Coyuca de Benítez, Gro.
24/10/2013	05:00:20	16.11	-95.64	23	4.6	salina cruz, Oax.
01/12/2013	03:20:54	17.32	-101.7	10	5.4	Zihuatanejo, Gro.
04/12/2013	07:25:18	15.81	-98.47	7	4.9	Pinotepa Nacional, Oax.
07/12/2013	05:32:44	16.13	-98.6	15	4.5	Pinotepa Nacional, Oax.
19/12/2013	02:43:49	17.62	-94.99	134	4.3	Sayula de Alemán, Ver.
25/01/2017	20:54:38	17.65	-96.43	170	5.1	Jáltipan de Morelos, Ver.
15/02/2017	09:56:39	19.32	-96.24	16	4.8	José Cardel, Ver.
15/02/2017	17:24:54	19.38	-96.09	15	4	Veracruz, Ver.
26/02/2017	02:11:29	19.9	-96.85	15	4	Misantla, Ver.
<b>08/09/2017</b>	<b>04:49:18</b>	<b>14.85</b>	<b>-94.11</b>	<b>58</b>	<b>8.2</b>	<b>Pijijiapan, Chis.</b>
08/09/2017	08:34:34	15.17	-94.52	16	5.9	Tonalá, Chis.
<b>19/09/2017</b>	<b>18:14:40</b>	<b>18.40</b>	<b>-98.72</b>	<b>57</b>	<b>7.1</b>	<b>Axochiapan, Mor.</b>
22/12/2017	18:58:09	20.30	-97.21	10	4.3	Papantla, Ver.
<b>04/08/2021</b>	<b>04:58:27</b>	<b>19.25</b>	<b>-96.08</b>	<b>15</b>	<b>4.9</b>	<b>Veracruz, Ver.</b>

El cálculo de los HVESRs para cada sitio y sismo considerados se realizó mediante el siguiente procedimiento, con ayuda del software libre GEOPSY versión 3.3.1 (Wathelet et al., 2019). Primero se seleccionó el segmento del registro dado por la fase intensa del sismo, que comprende desde el tiempo de arribo de las ondas de corte hasta el inicio de las ondas coda. El procesamiento se realizó empleando

ventanas de 40.96 s en las cuales se aplicó un taper tipo Tukey del 5% de su longitud total y traslapando el 5 % de dicha longitud. Se utilizaron ventanas de 40.96 s debido a que para calcular los cocientes H/V, Geopsy utiliza el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y este requiere que el número de puntos sea una potencia de 2 o 2<sup>n</sup>. Así, la ventana de 40.96 s tiene 4096 puntos muestreados que equivale a 2<sup>12</sup>. Posteriormente se calcularon sus espectros de amplitudes de Fourier, suavizándolos mediante la función de Konno y Ohmachi (Konno y Ohmachi, 1998) al 20 %. Se calcularon los cocientes H/V de ambas componentes horizontales, para observar si presentaban diferencias significativas. Como ambos cocientes fueron similares se calculó un único HVESR que, por tratarse de registros de sismos, se empleó el método de la media cuadrática para combinar las componentes horizontales. Al aplicar este método, GEOPSY reporta tres HVNSRs, el NHVSR promedio y los correspondientes al promedio  $\pm$  una desviación estándar. En los cálculos realizados se empleó el NHVSR promedio.

El cálculo de los HVNSRs para cada sitio considerado se realizó mediante el siguiente procedimiento, también con ayuda del software GEOPSY. Primero se acondicionó la señal de vibración ambiental mediante una corrección por ceros y por línea base y un filtro pasa banda de 0.1 a 10 Hz tipo Butterworth causal de cuarto orden. El procesamiento se realizó empleando ventanas de 40.96 s en las cuales se aplicó un taper tipo Tukey del 5% de su longitud total y traslapando el 5 % de dicha longitud. Posteriormente se calcularon los espectros de amplitudes de Fourier de cada ventana, suavizándolos mediante la función de Konno y Ohmachi entre el 20 y el 40%, dependiendo de la señal. Se calcularon los cocientes H/V de ambas componentes horizontales, para observar si presentaban diferencias significativas. Como ambos cocientes fueron similares, se calculó un único HVNSR empleando el criterio de la energía horizontal total que ofrece GEOPSY para combinar las componentes horizontales del registro. La representación matemática de dicho criterio se muestra en la ec. 2, y de la comparación de las ecs. 1 y 2 se observa que este criterio es similar al MDEDs propuesto por (Sánchez-Sesma et al., 2011).

$$[H/V](f) = \sqrt{N^2(f) + E^2(f)} / V(f) \quad (2)$$

Donde  $N$ ,  $E$  y  $V$  son los espectros de amplitudes de Fourier de las componentes norte-sur, este-oeste y vertical, respectivamente.

Se empleó el criterio de la energía horizontal total debido a que Geopsy no ofrece la opción de emplear el MDEDs. La diferencia entre el MDEDs y el criterio de la energía horizontal radica en que, en la primera formulación, la ec. 1 se aplica sobre longitud total del registro, por lo que se obtiene un único HVNSR, mientras que, en la segunda formulación, la ec. 2 se aplica sobre cierto número de ventanas, con lo que se obtienen tres HVNSRs, el NHVSR promedio y los correspondientes al promedio  $\pm$  una desviación estándar. En los cálculos realizados se empleó el NHVSR promedio, el cual, en general, es similar al NHVSR obtenido con el MDEDs. Después de calcular todos los HVESRs y HVNSRs, se seleccionaron aquellos en los que se observaron efectos de sitio. De acuerdo con (Borcherdt, 1970), un sitio en cuya función de transferencia la amplificación relativa máxima es menor que dos en un intervalo de frecuencias de 0.2 a 10 Hz, el cual es el intervalo de mayor interés para aplicaciones en ingeniería sísmica, puede ser considerado sin efectos de sitio. Por lo anterior, se seleccionaron solo los HVESRs y HVNSRs cuya amplificación relativa máxima fue mayor que dos.

Posteriormente se obtienen las FAARs para los diferentes sismos que han actuado en cada sitio considerado, calculando el cociente punto a punto de las amplitudes del HVESR obtenido para cada uno de los sismos considerados, entre las amplitudes del HVNSR. A continuación, se calcula el promedio de las anteriores FAARs para cada sitio. Debido a que los sitios tienen diferentes frecuencias predominantes, para calcular la FAAR promedio de todos los sitios para un determinado tipo de suelo, se consideró apropiado

primero normalizar las frecuencias de la FAAR promedio de cada sitio, respecto a su frecuencia predominante obtenida del HVNSR, lo que resultó en las FAARs promedio normalizadas mostradas en la fig. 2. Al efectuar esta operación, los valores de las frecuencias normalizadas y los incrementos de éstas en cada FAAR promedio son diferentes, por lo que se desarrolló un algoritmo para interpolar dichas frecuencias y sus correspondientes amplitudes, de tal forma que los valores de las frecuencias normalizadas y los incrementos de éstas fueran iguales en todas las FAARs promedio. Realizado lo anterior, se sumaron punto a punto las amplitudes de las FAARs promedio normalizadas de todos los sitios correspondientes a cada frecuencia normalizada y posteriormente se calculó el valor promedio de cada suma, con lo que se obtuvo la FAAR promedio normalizada para cada tipo de suelo considerado. En la fig. 2 se muestran las gráficas de dichas FAARs para los tres tipos de suelo de la ZCVB, las cuales se pueden publicar en forma de matriz en las normas de diseño sísmico de los reglamentos de construcción municipales, para que los usuarios accedan a ellas.

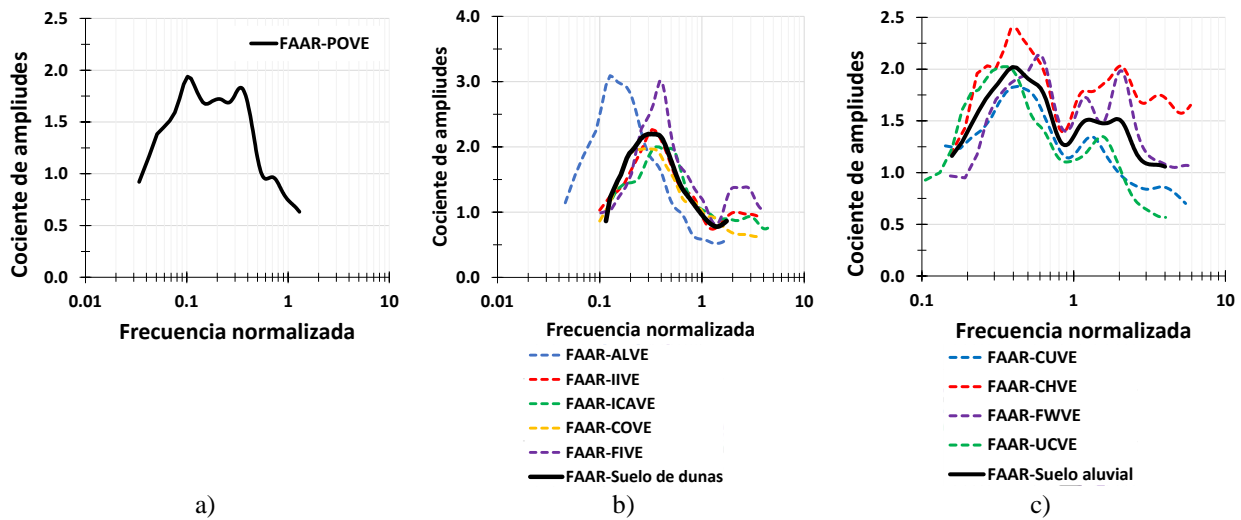


Figura 2. FAARs promedio normalizadas para cada sitio considerado en los tres tipos de suelo y FAAR promedio normalizada para cada tipo de suelo de la ZCVB.

En la fig. 2, valores del cociente de amplitudes mayores que la unidad indican que las amplitudes relativas del HVESR son mayores que las correspondientes del HVNSR. Además, valores de la frecuencia normalizada menores que la unidad indican frecuencias menores que la frecuencia predominante del depósito de suelo. En la fig. 2a se muestra la FAAR promedio normalizada de la estación “POVE” que, por ser la única estación en suelo muy denso, representa la FAAR promedio normalizada para suelo muy denso. En dicha figura se puede observar que para frecuencias menores que aproximadamente el 60% de la frecuencia predominante, las amplitudes relativas de los HVESR son, en promedio, mayores que las correspondientes del HVNSR, mientras que para frecuencias mayores sucede lo contrario. También se puede observar que en el intervalo de frecuencias donde las amplitudes del HVESR son mayores que las correspondientes del HVNSR, las primeras amplitudes son, en promedio, desde ligera hasta considerablemente mayores (del orden del doble) que las segundas. Resultados similares se pueden observar en las FAARs obtenidas en las diferentes estaciones ubicadas tanto en suelo de dunas como suelo aluvial mostradas en las figs. 2b y 2c, respectivamente, solo que varían los valores de las frecuencias que separan los intervalos en los que las amplitudes del HVESR son mayores que las correspondientes del HVNSR. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por (Martínez, 2015).

Una vez obtenida la FAAR, el ajuste o “corrección” de las amplitudes del HVNSR en el sitio de interés se realiza mediante el siguiente procedimiento. Primero se debe desnormalizar las frecuencias de la

FAAR promedio normalizada correspondiente al tipo de suelo en el sitio, multiplicándolas por la frecuencia predominante del depósito de suelo en el sitio obtenida de su HVNSR. Al efectuar esta operación, las frecuencias desnormalizadas de la FAAR serán, en general, diferentes de las frecuencias del HVNSR, en cuyo caso se debe aplicar nuevamente el algoritmo para interpolar las frecuencias desnormalizadas y sus correspondientes amplitudes, de tal forma que sus valores sean iguales a las frecuencias del HVNSR. Posteriormente se multiplican punto a punto las amplitudes de ambas funciones discretas, y la función resultante será el HVNSR ajustado.

Por otra parte, sería deseable que una FAAR promedio se calculara considerando una adecuada densidad de sitios distribuidos lo más uniformemente posible dentro de la región de interés, ya que dicha FAAR consideraría la contribución de muchos sitios y por lo tanto sería más adecuada para fines de diseño. Sin embargo, debido a que en los sitios se deben construir y operar estaciones temporales de registro sísmico, es evidente que realizar lo anterior no es sencillo, ni rápido, ni económico. A pesar de esto, los autores del presente estudio consideran que es un esfuerzo que vale la pena que realicen conjuntamente la administración del municipio, las asociaciones profesionales y las universidades locales.

Considerando los diversos aspectos mostrados y discutidos anteriormente, con la finalidad de que las FAARs promedio consideren la contribución de un mayor número de sitios, es necesario que en la red de monitoreo sísmico de la ZCVB se establezcan estaciones temporales en muchos más sitios distribuidos lo más uniformemente posible en las zonas correspondientes a cada uno de los tres tipos de suelo, para obtener sus FAARs e incorporarlas a las respectivas FAARs promedio. Esto solo se podrá lograr a largo plazo.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA CONSTRUIR EESs PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS CONVENCIONALES**

En esta sección se inicia describiendo el planteamiento tanto del procedimiento que se recomienda en el CDS-MDOC-2015 para la construcción de EESs para el diseño de estructuras importantes como del procedimiento propuesto para construir EESs para el diseño de estructuras convencionales, con el propósito de mostrar sus diferencias. Posteriormente se resumen las limitaciones del procedimiento propuesto, se mencionan algunos aspectos recomendados para su implementación y se describen las etapas para dicha implementación.

### **Descripción de los procedimientos normativo y propuesto para construir EESs para el diseño de estructuras importantes y convencionales, respectivamente.**

Mediante la exploración detallada del subsuelo especificada en la sección 3.1.5.1 del CDS-MDOC-2015, se obtienen las propiedades de cada uno de los estratos del depósito de suelo idealizado como un medio elástico con estratificación horizontal, con lo cual, como se mencionó anteriormente, es posible obtener su FTT. Así, una de las formas más comunes de implementar el procedimiento recomendado en la sección 3.1.6.1. del CDS-MDOC-2015 para la construcción de EESs para estructuras importantes, consiste básicamente en efectuar la convolución del movimiento sísmico (acelerograma) de diseño que se considera actúa en el basamento rocoso del sitio de interés, con la FTT, para obtener el movimiento de diseño en la superficie del suelo.

Respecto al procedimiento aquí propuesto, anteriormente se mencionó que al cociente espectral H/V se le considera una aproximación de la función de transferencia de un depósito de suelo (Robles y Jiménez, 2017). Con base en lo anterior, el procedimiento propuesto consiste esencialmente en efectuar una “seudoconvolución” del acelerograma de diseño que se considera actúa en el basamento rocoso del sitio de

interés, con el HVNSR del depósito de suelo obtenido con el MDEDs o con el criterio de la energía horizontal total que ofrece Geopsy, y ajustado con la FAAR; para obtener el correspondiente movimiento en la superficie del suelo. Cabe mencionar que en el CDS-MDOC-2015 se recomienda usar el HVNSR únicamente para estimar el periodo predominante de un depósito de suelo. En el presente estudio se denomina pseudoconvolución a la operación que consiste en multiplicar punto a punto el espectro de amplitudes de Fourier (transformada rápida de Fourier) del acelerograma de diseño en roca, con el HVNSR, y al producto obtenido calcularle la transformada inversa rápida de Fourier, para obtener el correspondiente acelerograma en la superficie del suelo. Dicho acelerograma tendrá la misma duración que el movimiento en roca, un contenido de frecuencias diferente y, dependiendo de las características de las amplitudes relativas (amplificaciones y atenuaciones) del HVNSR, tendrá aceleraciones mayores que el movimiento en roca en algunos intervalos de tiempo y aceleraciones menores en otros intervalos. Se usa el término pseudoconvolución para diferenciar esta operación de aquella que establece el teorema de convolución de funciones.

La descripción del planteamiento de ambos procedimientos muestra que son similares y la principal diferencia entre ellos es la forma en la que se caracterizan los efectos de sitio en el depósito de suelo. En el procedimiento normativo los efectos de sitio se caracterizan por medio de la FTT, para cuya obtención se requiere realizar una exploración detallada de subsuelo, la cual como se mencionó, frecuentemente es costosa. En el procedimiento propuesto en este trabajo los efectos de sitio se caracterizan por medio del HVNSR, cuya obtención es considerablemente menos costosa que la exploración detallada de subsuelo y que la exploración básica para clasificar el tipo de terreno. Debido a la similitud de ambos procedimientos, el aquí propuesto se considera una adaptación del procedimiento normativo, que es económicamente factible de implementar para construir EESs para el diseño de gran parte de las estructuras con clasificación B1.

### **Limitaciones del procedimiento propuesto**

Debido a que el procedimiento propuesto se basa en la aplicación de la técnica HVNSR, su aplicación tiene las mismas limitantes que dicha técnica. A continuación, se enlistan los criterios comúnmente empleados en la práctica profesional (algunos de los cuales ya se mencionaron), que de cumplirse en los cocientes HVNSRs obtenidos en el sitio de interés, se suele descartar la aplicación de dicha técnica y, por lo tanto, también se debe descartar la aplicación del procedimiento propuesto: (1) El cociente HVNSR es aproximadamente horizontal y no es posible distinguir ningún pico (2) El cociente HVNSR tiene uno o más picos relativamente angostos, pero su amplitud es menor que 2, (3) El cociente HVNSR tiene algunos picos relativamente angostos de amplitud similar y mayor que 2, pero en una banda ancha de frecuencias, (4) El cociente HVNSR tiene un pico con amplitud mayor que 2, pero muy ancho. Alternativamente, pueden emplearse los criterios recomendados en el reporte del proyecto SESAME (SESAME, European Research Project, 2004), para definir las condiciones de amplificación y claridad de los picos en los cocientes HVNSR.

Si en una región no se dispone de una red de monitoreo sísmico local y por lo tanto no es posible calcular las FAARs, no es recomendable aplicar el procedimiento propuesto, ya que como se mostró, mediante la aplicación de la técnica HVNSR pueden subestimarse desde ligera hasta considerablemente las amplificaciones relativas del movimiento en la superficie del suelo.

### **Recomendaciones para la implementación del procedimiento propuesto**

Para la implementación del procedimiento propuesto no se requiere aplicar otra técnica para estimar los efectos de sitio. Sin embargo, si la economía del proyecto no se afecta severamente, es muy recomendable extender la exploración geotécnica hasta la profundidad recomendada para la exploración básica requerida para construir los ETRs normativos (hasta un estrato lo suficientemente firme (roca o suelo

con  $V_s \geq 720$  m/s) o 30 metros de profundidad, lo que se presente primero). En la sección 3.1.4.2 del CDS-MDOC-2008 se presenta una tabla en la que, en función del número de golpes obtenidos de la prueba de penetración estándar para cada estrato, se proporciona una clasificación “gruesa” del tipo de suelo (roca, firme, medio y blando) y sus correspondientes valores de la  $V_s$  y el peso volumétrico. Se puede utilizar dicha tabla para economizar la mencionada extensión de la exploración, realizándola mediante pruebas de penetración estándar. Los resultados obtenidos de dicha exploración permitirán conocer, de forma aproximada, las variaciones en las propiedades de los estratos en ambas direcciones laterales y en profundidad en distintos puntos del predio, y los efectos de dichas variaciones (cambios graduales o bruscos de los contrastes de impedancias, inversiones de la  $V_s$ , etc.). El conocimiento de estas condiciones ayudará a planear adecuadamente la ubicación del punto o puntos dentro del predio en los que se considere apropiado obtener registros de vibración ambiental, y a tener mayor certeza en la interpretación de los resultados obtenidos con la técnica HVNSR (SESAME, European Research Project, 2004).

En el CDS-MDOC-2015 se especifican un conjunto de parámetros para construir los ETRs, entre los cuales están las aceleraciones máximas del terreno y espectral. Estos parámetros son directamente proporcionales a los denominados factores de sitio y de respuesta, respectivamente, y de acuerdo con Pérez-Rocha et al., 2019, en estos factores se toman en cuenta los efectos de la no linealidad debida al comportamiento de los materiales del suelo. En la sección 3.1.6.2 del CDS-MDOC-2015 se proporcionan expresiones para calcular los valores de ambos factores en función de la zona sísmica, la aceleración máxima en roca obtenida del espectro de referencia en roca y del tipo de terreno. Para un determinado sitio que tiene cierta aceleración máxima en roca y está ubicado en cierta zona sísmica, los mayores valores de los factores de sitio y de respuesta corresponden al terreno tipo III. Debido a que con la técnica HVNSR no es posible inferir que un suelo puede presentar comportamiento no lineal ante demandas sísmicas de moderada y gran intensidad, se recomienda el siguiente criterio simplificado con el que se pretende subsanar esta limitante. En los EESs construidos con el procedimiento propuesto se considerarán como valores mínimos de los factores de sitio y de respuesta, los correspondientes al terreno tipo III, independientemente del grado de firmeza del suelo en el sitio de interés. Con este criterio, se considera que se estarían tomando en cuenta satisfactoriamente los efectos de la no linealidad del suelo.

### **Etapas para la implementación del procedimiento propuesto**

A continuación, se enuncia la secuencia de etapas para implementar el procedimiento propuesto para construir un EES para el diseño de estructuras convencionales, considerando los diferentes aspectos discutidos en esta sección del documento y en la sección anterior. Por razones de brevedad, se describen las actividades generales a realizar en cada etapa. Es importante tener en cuenta que como se mencionó anteriormente, en una situación ideal en la que en el reglamento de construcciones municipal ya se haya desarrollado una norma de diseño sísmico propia, la que al menos contenga los ETRs construidos para cada uno de los tipos de suelos locales; el procedimiento propuesto solo se aplicará si se desean obtener demandas sísmicas de diseño aún más racionales que las proporcionadas por los ETRs, y si para ello no es posible aplicar las técnicas SSR o HVESR. Se espera que las ordenadas de los EESs sean, en general, menores que las de los ETRs, sin embargo, puede suceder lo contrario.

1. Es muy recomendable extender la exploración requerida para el proyecto geotécnico de la cimentación hasta una profundidad en la que se localice un estrato lo suficientemente firme (roca o suelo con  $V_s \geq 720$  m/s) o 30 metros, lo que se presente primero. Con base en las propiedades del subsuelo observadas y de las dimensiones en planta de la estructura a diseñar, se planeará la ubicación dentro del predio de uno o más puntos en los que se obtendrán registros de vibración ambiental.

2. Obtener el HVNSR en el punto o puntos anteriormente definidos. En caso de que en el HVNSR o los HVNSRs obtenidos se observe que se deberá descartar la aplicación de esta técnica, se deberá evaluar si es económicamente factible construir un EES para estructuras importantes en apego al conjunto de lineamientos que se establecen en el CDS-MDOC-2015. En caso de que no sea factible, se deberá emplear el ETR que aplique de acuerdo con el tipo de suelo, especificado en la norma de diseño sísmico del reglamento de construcciones del municipio. En caso de que se hayan obtenido registros de vibración ambiental en varios puntos y los correspondientes HVNSRs se consideren adecuados para estimar los efectos de sitio, pero sus características sean muy diferentes; se deberá analizar en conjunto con el ingeniero estructural cuales se emplearán para caracterizar los efectos de sitio en el predio.

3. Ajustar las amplitudes relativas del HVNSR o los HVNSRs considerados, mediante la FAAR promedio que aplique de acuerdo con el tipo de suelo en el sitio de interés. Dicha FAAR la proporcionaría la norma de diseño sísmico del reglamento de construcciones del municipio.

4. A partir de esta etapa se aplica esencialmente el procedimiento especificado en la sección 3.1.6.1 del CDS-MDOC-2015 para construir un EES transparente de diseño en la superficie del suelo. La principal diferencia consiste en que se debe efectuar la pseudoconvolución del acelerograma de diseño que se considera actúa en el basamento rocoso del sitio de interés, con el HVNSR ajustado.

## **IMPLEMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA CONSTRUIR ETRs EN LA ZCVB**

Como ejemplo de aplicación, mediante el procedimiento propuesto se obtiene el ETR de diseño para suelo de dunas en la ZCVB. Dicho espectro se podrá emplear para el diseño sísmico de estructuras con importancia convencional ubicadas en este tipo de suelo en la ZCVB. A continuación, se describen a detalle las etapas a seguir mencionadas en la sección anterior.

1. Obtención de registros de vibración ambiental en diferentes sitios de la ZCVB. Se obtuvieron registros de vibración ambiental en 44 sitios de la ZCVB, los cuales se muestran en la fig. 1, empleando sismómetros triaxiales de banda ancha GURALP modelo 6TD. Los registros se tomaron durante 2 horas, a 100 muestras por segundo y mientras fuera posible sobre terreno natural, y con condiciones climáticas adecuadas.

2. Cálculo y selección de los HVNSR a emplear. Para el cálculo de dichos cocientes se empleó el mismo procedimiento descrito anteriormente. Como se mencionó, el software GEOPSPY reporta tres NHVSRs, el NHVSR promedio y los correspondientes al promedio  $\pm$  una desviación estándar. Considerando que las amplitudes relativas del NHVSR dependen de las propiedades del suelo, en el presente estudio se empleó el NHVSR correspondiente a la media más una desviación estándar con la finalidad de tomar en cuenta, para fines de diseño y de forma indirecta y aproximada, las incertidumbres en las propiedades del suelo en todas las ordenadas espectrales. Por lo anterior, para cada sitio se consideró el NHVSR correspondiente al promedio más una desviación estándar. Una vez calculados los NHVSRs para los 44 sitios, se agruparon de acuerdo con los tres tipos de suelo identificados en la microzonificación de la ZCVB. En la fig. 3 se muestran dichos NHVSRs únicamente para suelo de dunas. La línea horizontal punteada negra en la figura es para indicar una amplificación relativa de dos, valor que como se mencionó, separa los suelos que no presentan efectos de sitio de los que si lo presentan.

Las frecuencias predominantes de los suelos de dunas y sus correspondientes amplitudes relativas máximas, ambas para fines de diseño, se ubican en los siguientes respectivos intervalos: de 2.20 a 5.83 Hz



y de 2.42 a 6.38. De estos NHVSRs se seleccionaron tres que definen aproximadamente una envolvente de todos. En la fig. 3 se muestran con líneas continuas gruesas los NHVSRs seleccionados.

3. Ajuste de las amplitudes relativas de los HVNSRs seleccionados mediante las FAARs promedio. Para esto, las amplitudes relativas de los tres NHVSRs seleccionados en la etapa anterior se multiplicaron punto a punto por la FAAR promedio desnormalizada correspondiente al suelo de dunas. En la fig. 4 se comparan los tres NHVSRs seleccionados con sus correspondientes ajustados.

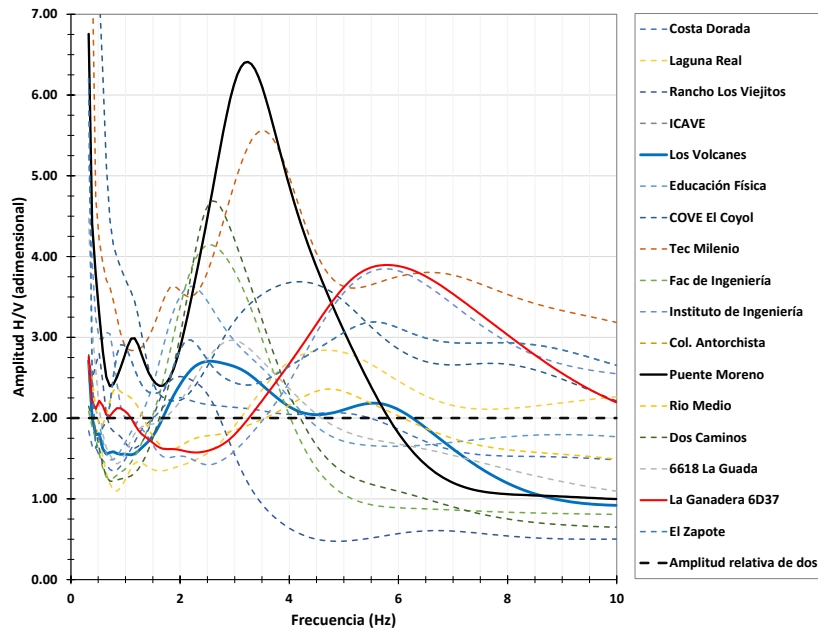


Figura 3. NHVSRs en suelo de dunas correspondientes al promedio más una desviación estándar

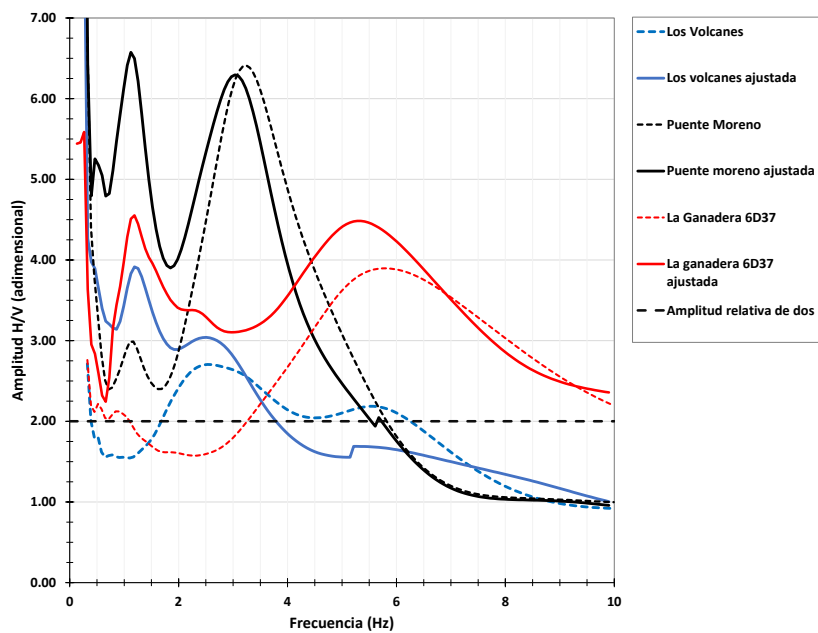


Figura 4. NHVSRs seleccionados y sus correspondientes NHVSRs ajustados en suelo de dunas.

4.1. Obtención del espectro de diseño en el basamento rocoso. En el CDS-MDOC-CFE-2015 a este espectro se le denomina espectro de referencia (ER), el cual es un espectro de peligro uniforme proporcionado por el software PRODISIS versión 4.1 (CFE, 2017), que define las aceleraciones de diseño en roca para cualquier lugar de la República Mexicana. El ER se obtiene introduciendo en el PRODISIS las coordenadas geográficas del sitio en el que se ubicará la estructura. Debido a que los ER correspondientes a distintos sitios de la ZCVB son muy similares, se consideró el ER que proporciona el PRODISIS para el municipio de Veracruz como representativo para toda la ZCVB. En la fig. 5 se muestra este espectro y se observa que la máxima aceleración en roca es de  $95.88 \text{ cm/s}^2$  y la máxima aceleración espectral es de  $285.98 \text{ cm/s}^2$ .

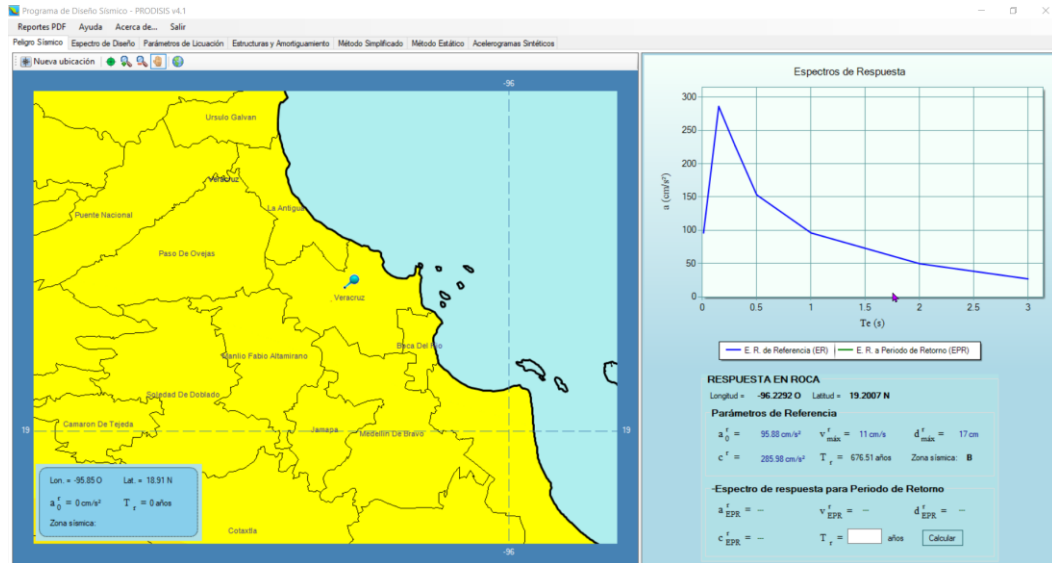


Figura 5. Espectro de peligro uniforme en roca (ER) para el municipio de Veracruz.

4.2. Obtención de los movimientos sísmicos de diseño en el basamento rocoso. En el CDS-MDOC-CFE-2015 se indica obtener al menos cinco acelerogramas sintéticos cuyos espectros de respuesta sean compatibles con el ER. Con ayuda del software PRODISIS se generaron cinco de dichos acelerogramas.

4.3. Obtención de los movimientos sísmicos de diseño en la superficie de suelo. Para esto se realizó la pseudoconvolución de los cinco acelerogramas previamente obtenidos con cada uno de los tres NHVSRs ajustados, para obtener los movimientos sísmicos de diseño en la superficie del suelo. Para efectuar la pseudoconvolución se desarrolló un algoritmo en un software comercial de programación.

4.4. Obtención de los EESs elásticos en la superficie del suelo. Con la ayuda del software DEGTRA versión 9.3.0 (Ordaz y Montoya, 2013), a los acelerogramas obtenidos previamente se les calcularon sus espectros de respuesta elásticos de aceleración considerando un 5% de amortiguamiento, los cuales son los EESs en la superficie del suelo. Posteriormente se promediaron cada una de las tres familias de los cinco EESs calculados para obtener un conjunto de tres EESs promedio representativos para suelo de dunas. En la fig. 7 se muestran el conjunto de EESs elásticos promedio de aceleración para suelo de dunas.

4.5. Obtención de los EESs inelásticos en la superficie del suelo. Con la ayuda del software DEGTRA, al conjunto de tres EESs elásticos de aceleración se les calcularon sus correspondientes espectros inelásticos de resistencia para los siguientes cuatro valores de ductilidad: 1.5, 2, 3 y 4; considerando que el comportamiento de los osciladores de un grado de libertad es bilineal elastoplástico. Cada una de las familias

de EESs inelásticos para cada valor de ductilidad se promediaron, con lo que por cada valor de ductilidad se obtuvo un conjunto de tres EESs inelásticos promedio de resistencia. En la fig. 6 se muestra el conjunto correspondiente a una ductilidad de dos.

4.6. Construcción de los ETRs. Para esto, se aplicó el procedimiento descrito en la sección 3.1.6.1 del CDS-MDOC-2015 para calcular los parámetros espectrales que intervienen en la forma funcional de EESs para fines de diseño. La ec. 3 replica dicha forma funcional.

$$Sa(T_e, \beta) = \left\{ \begin{array}{ll} a_0 + [c \beta(T_e, \zeta_e) - a_0] \frac{T_e}{T_a}; & \text{si } T_e < T_a \\ c \beta(T_e, \zeta_e); & \text{si } T_a \leq T_e < T_b \\ c \beta(T_e, \zeta_e) \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^r; & \text{si } T_b \leq T_e < T_c \\ c \beta(T_e, \zeta_e) \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^r p_c(T_e) \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2; & \text{si } T_e \geq T_c \end{array} \right\} \quad (3)$$

Donde:

$a_0$  Es la aceleración máxima del terreno (cm/s<sup>2</sup>).

$c$  Es la aceleración máxima espectral (cm/s<sup>2</sup>).

$T_a$  Es el límite inferior de la meseta del espectro de diseño (s).

$T_b$  Es el límite superior de la meseta del espectro de diseño (s).

$T_c$  Es el periodo de inicio de la rama descendente en que los desplazamientos espectrales tienden correctamente al desplazamiento del terreno (s).

$T_e$  Es el periodo estructural en la dirección del análisis (s).

$(T_e, \zeta_e)$  Es el factor de amortiguamiento. Para un amortiguamiento estructural  $\zeta_e=5\%$ , el valor de  $\beta(T_e, 0.05) = 1$ .

$r$  Es el parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales para  $T_b \leq T_e < T_c$

$k$  Es el parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales para  $T_e \geq T_c$

$p_c(T_e)$  es un factor empleado para definir la variación del espectro en la rama descendente calculando de la siguiente forma, (ec. 4) tomada del CDS-MDOC-2015.

$$p_c(T_e) = k + (1 - k) \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2 \quad (4)$$

Los autores del presente estudio consideran que mediante la aplicación del criterio simplificado recomendado en el CDS-MDOC-2015 para considerar las incertidumbres en las propiedades del suelo, el cual consiste en incrementar solo el valor de la máxima ordenada del espectro elástico de diseño, únicamente se consideran las incertidumbres mencionadas en dicha ordenada. Dichos autores también consideran que, mediante la aplicación del criterio simplificado recomendado para considerar la incertidumbre en el periodo estructural, que consiste en “ensanchar” solo la meseta del ETR, únicamente se considera dicha incertidumbre en los periodos estructurales ubicados en la meseta. En esta subetapa, ambos criterios se sustituyen por otros, también simplificados, pero que se consideran más adecuados.

El procedimiento que a continuación se describe se aplicó a cada conjunto de EESs elásticos promedio de aceleraciones correspondientes a los tres sitios de suelo de dunas de la ZCVB. Como se mencionó anteriormente, al considerar el NHVSR correspondiente a la media más una desviación estándar se tomaron en cuenta de forma indirecta y aproximada las incertidumbres en las propiedades del suelo en todas las ordenadas espectrales, ya que las amplitudes relativas del NHVSR dependen de las propiedades del suelo. Con la finalidad de considerar la incertidumbre en cada uno de los periodos estructurales de los EESs, tanto

elásticos como inelásticos, se aplicó un procedimiento práctico recomendado por (Ordaz y Veras, 2003), que consiste en aumentar el ancho del espectro de tal forma que la ordenada correspondiente a cada periodo,  $T$ , en el espectro ensanchado, sea la máxima de entre las ubicadas dentro del intervalo  $[T/(1+\alpha), T(1+\alpha)]$  en el espectro original.  $\alpha$  es el error en la estimación del periodo, para el cual (Ordaz y Veras, 2003) consideran que un valor de 0.25 es razonable en la mayor parte de los casos. Los valores de los parámetros espectrales  $a_0$ ,  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $c$ ,  $r$ ,  $k$  y  $T_c$  se obtuvieron gráficamente por tanteos, de tal manera que el ETR de aceleración represente una envolvente lo más ajustada posible del conjunto de EESs elásticos promedio de aceleración (considerando la incertidumbre en el periodo estructural); en el intervalo completo de periodos estructurales.

A continuación, partiendo del ETR de aceleración se obtuvieron sus correspondientes espectros de diseño inelásticos (EDIs) reducidos solo por la ductilidad,  $Q$ , considerando los mismos valores de este parámetro con los que se calcularon los espectros inelásticos de respuesta correspondientes a los EESs elásticos. Para el cálculo de los EDIs se emplearon las expresiones para el factor reductor por ductilidad,  $Q'$ , especificadas en el CDS-MDOC-2015, las cuales se replican en la ec. 5.

$$Q'(T_e, Q) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta(T_e, \zeta_e) T_e}{k T_b}}; & \text{si } T_e \leq T_b \\ 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta(T_e, \zeta_e) p_b(T_e)}{k}}; & \text{si } T_e > T_b \end{array} \right\} \quad (5)$$

Donde:

$Q$  Es el factor de comportamiento sísmico especificado para cada tipo de estructura.

$p_b(T_e)$  es un factor empleado para definir la variación del espectro en la rama descendente, calculando de la siguiente forma (ec. 6).

$$p_b(T_e) = k + (1 - k) \left( \frac{T_b}{T_e} \right)^2 \quad (6)$$

Una vez calculados todos los EDIs para cada valor de  $Q$ , se compararon gráficamente con el conjunto de EESs inelásticos correspondientes al mismo valor de ductilidad (considerando la incertidumbre en el periodo estructural) para revisar que el EDI sea una envolvente de las ordenadas de todo el conjunto de EESs inelásticos, fig. 6. De cumplirse esta condición para todos los conjuntos de EESs inelásticos no se modifica el ETR. Si no se cumple esta condición para algunos conjuntos de EESs inelásticos, se incrementan simultáneamente la ordenada y/o el ancho de la meseta y/o el valor de  $T_c$  del ETR, se calculan nuevamente los EDIs y se vuelven a comparar con los EESs inelásticos para revisar si ahora se cumple la condición mencionada. En la tabla 2 se muestran los valores de los parámetros espectrales que definen al ETR para suelo de dunas. La fig. 7 muestra el ETR de aceleración, así como su respectivo conjunto de EESs elásticos promedio de aceleración (considerando las incertidumbres en el periodo estructural).

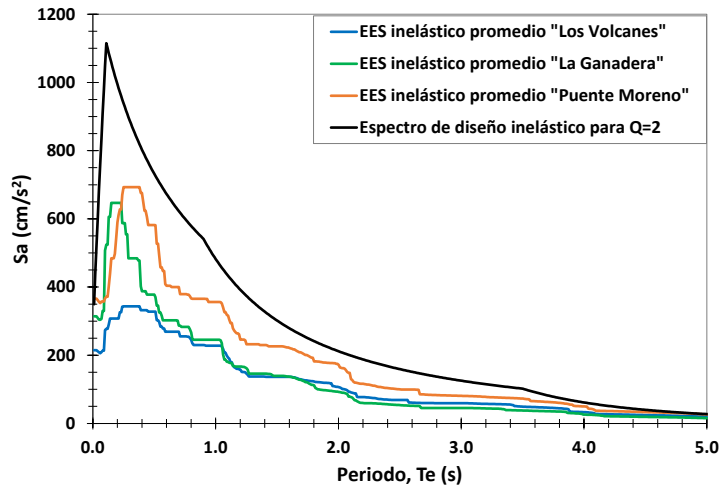


Fig. 6. Comparación del EDI para  $Q=2$  en suelo de dunas con el conjunto de EESs inelásticos promedio para el mismo tipo suelo y valor de ductilidad

Tabla 2. Parámetros espectrales obtenidos de la construcción del ETR

Tipo de suelo	$a_0$ ( $\text{cm/s}^2$ )	$T_a$ (s)	$T_b$ (s)	$T_c$ (s)	$c$ ( $\text{cm/s}^2$ )	$k, r$ (adimensional)	$F_{Sit}, F_{Res}$ (Del ETR) (adimensional)	$F_{Sit}, F_{Res}$ (Terreno tipo III) (adimensional)
Suelo de dunas	260	0.10	0.90	3.5	1308	0.50, 0.50	2.71, 5.03	2.42, 3.62

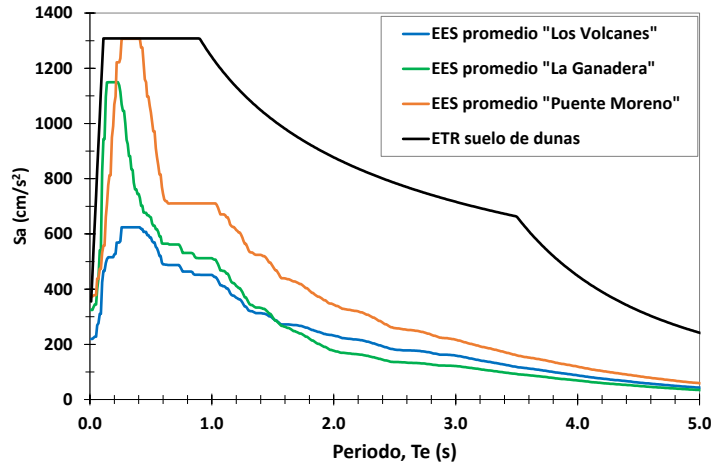


Figura 7. Conjunto de EESs elásticos promedio de aceleración y ETR de aceleración obtenido para suelo de dunas

En la tabla 2 también se muestran los factores de sitio ( $F_{Sit}$ ) y de respuesta ( $F_{Res}$ ) en función de los parámetros espectrales aceleración máxima en roca ( $a_0^r$ ),  $a_0$  y  $c$ , los cuales se obtuvieron de la construcción del ETR. El valor de  $a_0^r$  se muestra en la fig. 5 y es  $a_0^r=95.88 \text{ cm/s}^2$ , y los valores de  $a_0$  y  $c$  se muestran en la tabla 2. El valor de  $F_{Sit}$  se calcula como:  $F_{Sit}= a_0/a_0^r$  y el valor de  $F_{Res}$  como:  $F_{Res}= c/a_0$ . En la tabla 2 también se muestran los  $F_{Sit}$  y  $F_{Res}$  reportados por el software PRODISIS para el mismo sitio en el que se ubica el ER, el cual pertenece a la zona sísmica B y para terreno tipo III. Se puede observar que los  $F_{Sit}$  y  $F_{Res}$  obtenidos de la construcción del ETR son mayores que los correspondientes reportados por el PRODISIS por lo que, de acuerdo con lo discutido anteriormente, se podría considerar que se están tomando en cuenta satisfactoriamente los efectos de la no linealidad del suelo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Es de interés comparar el ETR obtenido para suelo de dunas en la ZCVB con alguno de los tres ETRs especificados en el CDS-MDOC-2015 para dicha zona. Para esto es necesario clasificar el subsuelo de los tres sitios considerados como representativos para suelo de dunas en alguno de los tres tipos de terreno (I, II y III) especificados en el manual referido. Como se mencionó anteriormente, de acuerdo con (Borcherdt, 1970), un sitio cuya amplificación relativa máxima es menor que dos en un intervalo de frecuencias de 0.2 a 10 Hz, puede ser considerado sin efectos de sitio. En el CDS-MDOC-2015 un suelo que no presenta efectos de sitio se clasifica como terreno tipo I. De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta que, para todos los sitios considerados sus amplificaciones relativas máximas dentro del intervalo de frecuencias mencionado son mayores que dos, algunos suelos resultarían clasificados como terreno tipo II y otros como terreno tipo III. Para tener la certeza de que tipo se trata, es necesario calcular las propiedades de los depósitos de suelo de los tres sitios considerados como representativos para suelo de dunas, de acuerdo con lo recomendado en la sección 3.1.5.2. del CDS-MDOC-2015, y con estos datos aplicar el procedimiento de clasificación especificado en dicha sección. Sin embargo, por limitaciones económicas no se realizó lo anterior, por lo que el ETR obtenido se compara con todos los espectros normativos para el diseño de estructuras del grupo B, a excepción del ETR para terreno tipo I.

En la fig. 8 se comparan el ETR de aceleración obtenido para suelo de dunas en la ZCVB, con los ETRs para terrenos tipo II y III y el EAC especificados en el CDS-MDOC -2015 para dicha zona. En la fig. 5 se observa que el ER tiene su máxima ordenada en aproximadamente 0.15 s, lo que indica que la frecuencia predominante del movimiento sísmico de diseño en roca,  $f_r$ , es de 6.67 Hz. En la fig. 4 se observa que las amplificaciones relativas máximas ajustadas para fines de diseño,  $A_0$ , de los suelos de dunas son de bajas a moderadas (de 3.03 a 6.50). Sin embargo, en la fig. 8 se observa que la máxima aceleración del ETR excede incluso a la del EAC. Esto se debe a que la frecuencia del segundo pico del HVNSR ajustado del sitio “puente moreno” (3.10 Hz), es relativamente similar a la  $f_r$ , por lo que se produce una amplificación considerable del movimiento de diseño al transmitirse de la roca a la superficie del suelo. Específicamente, la máxima aceleración del ETR es aproximadamente igual al producto de la amplitud del segundo pico del HVNSR ajustado del sitio “puente moreno” (6.22), por la ordenada en el ER (218.17 cm/s<sup>2</sup>) que corresponde al periodo estructural asociado a la frecuencia de dicho segundo pico ( $T=1/3.10$  Hz=0.32 s).

Si se tiene en cuenta que en el ETR obtenido se consideraron explícitamente los efectos de sitio, se puede considerar que proporciona estimaciones racionales de las aceleraciones en el intervalo completo de periodos estructurales. De acuerdo con lo anterior, en la fig. 8 se puede observar que prácticamente en el intervalo completo de periodos estructurales ambos ETRs normativos subestiman las demandas de aceleración, mientras que el EAC solo subestima dichas demandas en periodos cortos. Este resultado es parcialmente consistente con los obtenidos en las investigaciones preliminares realizadas por los autores del presente estudio, en las cuales se observó que los ETRs normativos sobrestiman las demandas sísmicas en periodos medianos y largos. Esto se debe a que, en dichas investigaciones, los efectos de sitio se caracterizaron mediante el HVNSR promedio, sin ajustar por medio de la FAAR y sin considerar la incertidumbre en el periodo estructural, lo que muestra que la consideración de estos aspectos puede incrementar significativamente las demandas sísmicas de diseño. La mayor contribución a dichas demandas en periodos medianos y largos se debió al ajuste realizado por medio de la FAAR, ya que como se observó anteriormente, las ordenadas de la FAAR en suelo de dunas para frecuencias menores que la predominante de los depósitos de suelo, varían desde valores cercanos a la unidad hasta del orden de dos veces la unidad.

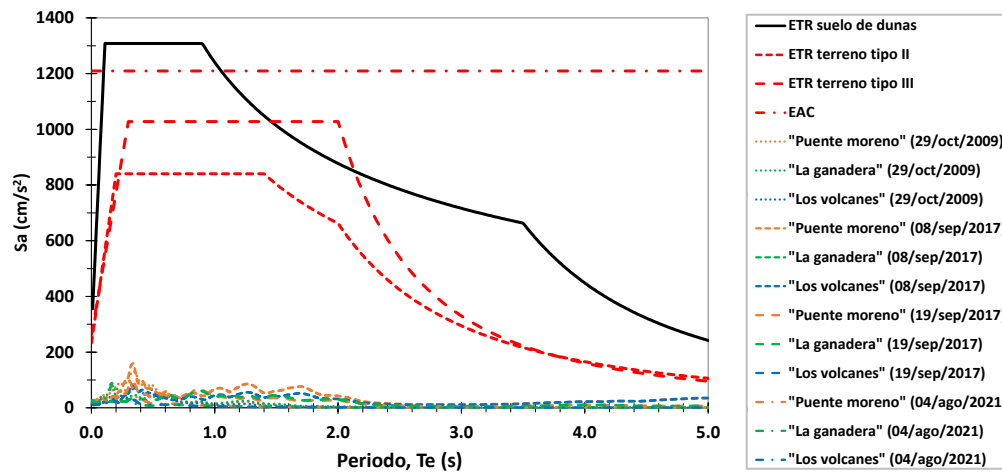


Figura 8. Comparación del ETR de aceleración obtenido con los ETRs normativos para estructuras del grupo B y con los espectros de respuesta de algunos sismos intensos registrados en la ZCVB

Los resultados obtenidos también sugieren que a pesar de que, al parecer, los terrenos tipo II y III incluyen varios tipos de suelo, en los correspondientes ETRs normativos no se consideran adecuadamente las demandas sísmicas en periodos medianos y largos que se presentan en los depósitos de suelo de dunas de la ZCVB. Situaciones como la anterior pueden esperarse y son comprensibles, ya que en los ETRs normativos difícilmente podrían considerarse de forma adecuada las condiciones particulares que existen en los depósitos de suelo en todo el país. Esto manifiesta la importancia de construir los ETRs que han de especificarse en las normas de diseño sísmico municipales, considerando los efectos de sitio en los depósitos de suelo locales.

Por otra parte, en la fig. 5 se puede observar que el periodo de retorno ( $T_r$ ) de las ordenadas del ER, y por lo tanto también el  $T_r$  de las ordenadas del ETR calculado es:  $T_r = 676.51$  años. De acuerdo con esto, si las ordenadas del ER se pueden considerar adecuadas, es posible verificar que las ordenadas del ETR también lo serán si solo las ordenadas de uno de los espectros de respuesta estimados en los suelos de dunas de la ZCVB, correspondientes a los sismos ocurridos en todo el país durante un periodo de 676.51 años, exceden las ordenadas del ETR en algún intervalo de periodos estructurales. En la fig. 8 se muestran los espectros de respuesta obtenidos en los mismos sitios considerados para construir el ETR, que corresponden a los siguientes sismos: el ocurrido el 29 de octubre de 2009 cerca de la ciudad de Alvarado, Veracruz. El ocurrido el 8 de septiembre de 2017 cerca de la ciudad de Pijijiapan, Chiapas. El ocurrido el 19 de septiembre de 2017 cerca de la ciudad de Axochiapan, Morelos, y el ocurrido el 4 de agosto de 2021 cerca de la costa de la ciudad de Veracruz. La información completa de estos sismos se muestra en la tabla 1 (con texto en negritas), y son algunos de los sismos que, por la combinación de su magnitud y distancia, han impuesto las mayores aceleraciones en la ZCVB. Se puede observar que las aceleraciones de todos los espectros de respuesta son significativamente menores que las del ETR calculado. La red de monitoreo sísmico de la ZCVB solo tiene 20 años en operación y hasta el momento ninguno de los espectros de respuesta de los sismos registrados en suelo de dunas ha excedido las ordenadas del ETR calculado. Para realizar la verificación mencionada, se tendrá que esperar el menor de los siguientes tiempos: (1) El tiempo para que dos de dichos espectros de respuesta excedan las ordenadas del ETR calculado, (2)  $(676.51 - 20) = 656.51$  años. Si el primer tiempo es menor que el segundo, se considerará que las ordenadas del ETR no serán adecuadas, de lo contrario, se considerará que dichas ordenadas serán adecuadas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente estudio se propuso un procedimiento para construir EESs para el diseño de estructuras de importancia convencional, que resultó de modificar la forma en la que se caracterizan los efectos de sitio en el procedimiento especificado en el CDS-MDOC-2015 para construir EESs para el diseño de estructuras importantes. En el procedimiento normativo los efectos de sitio se caracterizan mediante una FTT, mientras que en el procedimiento propuesto se caracterizan mediante cocientes HVNSRs obtenidos de registros de vibración ambiental, cuyo costo es más económico que la obtención de una FTT y que la de una exploración básica del subsuelo. Por lo anterior, el procedimiento propuesto es económicamente factible de aplicar, con las limitaciones que se mencionaron, para construir tanto EESs como ETRs para un determinado tipo de suelo, para el diseño de estructuras convencionales. El procedimiento propuesto se aplicó a la ZCVB para construir el ETR para suelo de dunas identificado en dicha zona. Con base en los resultados obtenidos en el presente estudio, se enuncian las siguientes conclusiones y recomendaciones.

1. Se puede considerar que el empleo de las FAARs permite subsanar satisfactoriamente el reconocido inconveniente que tienen los HVNSRs, el cual es que, en general, subestiman las amplitudes relativas del movimiento del suelo respecto al movimiento en roca. Esto se debe a que las amplitudes de los HVNSRs obtenidos en un determinado tipo de suelo de la ZCVB, ajustadas por medio de las FAARs, serán similares al promedio de las amplitudes de los HVESRs obtenidos en un conjunto de sitios de dicha conurbación cuyo suelo es del mismo tipo. Por lo tanto, mediante el empleo del HVNSR ajustado como función de transferencia, se puede considerar que se estimarán adecuadamente los efectos de sitio y por lo tanto se obtendrán estimaciones racionales de las demandas sísmicas.

2. Debido a que el ETR propuesto para la ZCVB fue construido tomando en cuenta explícitamente los efectos de sitio en los suelos locales, se puede considerar que dicho espectro proporciona estimaciones racionales de las demandas de aceleración en el intervalo completo de periodos estructurales. Por otro lado, como se observó, es difícil que en los ETRs especificados en el CDS-MDOC-2015 puedan considerarse adecuadamente las condiciones particulares que existen en los depósitos de suelo en todo el país. Por lo anterior, es de esperarse que, como se mostró en el presente estudio, los ETRs especificados en el CDS-MDOC-2015 proporcionen estimaciones racionales de las demandas sísmicas en algunos intervalos de periodos estructurales, mientras que en otros intervalos no.

3. Considerando que los ETRs construidos con el procedimiento propuesto proporcionan estimaciones racionales de las demandas sísmicas en el intervalo completo de periodos estructurales, se espera que todas las estructuras convencionales diseñadas con dichos espectros tengan un nivel de seguridad similar al establecido en el CDS-MDOC-2015. Si se tiene en cuenta que las estructuras convencionales representan un porcentaje muy significativo de las existentes en la ZCVB, el resultado esperado tendrá un considerable impacto positivo tanto económico como social en esta región.

4. Como se mencionó, con la finalidad de que las FAARs promedio consideren la contribución de un mayor número de sitios, es necesario que en la red de monitoreo sísmico de la ZCVB se establezcan estaciones temporales en muchos más sitios distribuidos lo más uniformemente posible en las zonas correspondientes a cada uno de los tres tipos de suelo, para obtener sus FAARs e incorporarlas a las respectivas FAARs promedio. Esto solo se podrá lograr a largo plazo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (COVEICyDET) para el desarrollo del presente proyecto, así como a Fondos Mixtos



CONACYT-Gobierno del Estado de Veracruz-Llave por el financiamiento de los trabajos de la ZCVB referenciados (<http://iiuv.org/sgisv/inicio/publicaciones.php>).

## REFERENCIAS

- Borcherdt, R D (1970), "Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay", *Bulletin of the Seismological Society of America*, No. 60, pp. 29-61.
- Caporal, P (2020), "Propuesta de espectro de diseño cuando no se estiman los efectos de sitio, para la zona conurbada Veracruz-Boca del Río", *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Boca del Río, Veracruz.
- CDS-MDOC-2008, Capítulo de Diseño por Sismo (2008), Manual de Diseño de Obras Civiles, Comisión Federal de Electricidad.
- CDS-MDOC-2015, Capítulo de Diseño por Sismo (2015), Manual de Diseño de Obras Civiles, Comisión Federal de Electricidad.
- GOGEV (2015), Reglamento para construcciones públicas y privadas del municipio libre de Veracruz. Gaceta Oficial del Gobierno del Estado de Veracruz, de Ignacio de la Llave. <http://gobiernoabierto.veracruzmunipio.gob.mx/wp-content/uploads/2018/08/REGLAMENTO-DE-CONSTRUCCIONES-P%C3%9ABLICAS-Y-PRIVADAS-PARA-EL-MUNICIPIO-LIBRE-DE-VERACRUZ.pdf>
- Gutiérrez, C y S K Singh (1992), "A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: Comparison of results from strong-motion and microtremor data", *Bulletin of the Seismological Society of America*, No. 78, pp. 42-63. doi: 10.1785/BSSA0820020642
- Kawase, H, Y Mori y F Nagashima (2018), "Diference of horizontal-to-vertical spectral ratios of observed earthquakes and microtremors and its application to S-wave velocity inversion based on the diffuse feld concept", *Earth, Planets and Space*, Vol. 70, No. 1, pp.1-32, doi:10.1186/s40623-017-0766-4
- Konno, K y T Ohmachi (1998), "Ground Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremors", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, No. 1, pp. 228-241. doi: 10.1785/BSSA0880010228
- Lermo, J F, J Chávez-García y J Urbieto (1991), "Microzonificación sísmica y análisis de amplificación relativa en la ciudad de Oaxaca", *Informe final elaborado por el Instituto de Ingeniería UNAM para CENAPRED*, Proyecto 0755.
- Lermo, J y F J Chávez García (1994), "Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 13, pp. 413-423. doi: 10.1016/0267-7261(94)90012-4
- Martínez, J A (2015), "Validación del factor de amplificación de los cocientes espectrales a partir de microtremores, para fines de mapas sísmicos de intensidad", *Tesis de Maestría*, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Civil, Distrito Federal. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/7328>
- Nakamura, Y (1989), "A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, pp. 25-33.
- Nakamura, Y (2000), "Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications", *Proccedings 12WCEE*, New Zealand.

- Ordaz, M y D Montoya D (2013), Software Degtra V9.3.0, Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México, México.
- Ordaz M, y L Veras (2003), “Criterios generales para la definición de espectros sísmicos de sitio”, *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, León, Guanajuato, México.
- Pérez-Rocha, L E, M G Ordaz y U Mena (2019), “Espectros de diseño de la versión 2015 del manual de diseño de obras civiles de CFE en comparación con los sismos de septiembre de 2017”, *XXII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Nuevo León, Monterrey, México.
- Software PRODISIS V 4.1 (2017), <https://www.ineel.mx/prodisis/es/prodisis.php>
- Riquer, G, F Williams, F Lermo, G Torres y R Leyva (2003), “Microzonificación sísmica de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río”, *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, León, Guanajuato, México. Sistema de Gestión de Información Sísmica de Veracruz. [www.iiuv.org/sgisv/documents/2003/Riquer et al 2003.pdf](http://www.iiuv.org/sgisv/documents/2003/Riquer%20et%20al%202003.pdf)
- Robles, A y J C Jiménez (2017), “Metodología para realizar estudios de microzonificación sísmica”, CENAPRED, México. [https://www1.cenapred.unam.mx/COORDINACION\\_ADMINISTRATIVA/SRM/FRACCION\\_XLI\\_A/50.pdf](https://www1.cenapred.unam.mx/COORDINACION_ADMINISTRATIVA/SRM/FRACCION_XLI_A/50.pdf)
- Rodríguez, L M (2020), “Comparación del grado de conservadurismo de los espectros regionales especificados por el MDOC-CFE 2015, para suelos tipo II y tipo III de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río”, *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Boca del Río, Veracruz.
- Sánchez-Sesma, F, S K Singh (1986), “Un programa de computadora para el cálculo de espectros de respuesta en formaciones estratificadas”, *Proyecto de investigación Centro de Investigación sísmica Fundación Javier Barros Sierra AC*.
- Sánchez-Sesma F J, M Rodríguez, U Iturrarán-Viveros, F Luzón, M Campillo, L Margerin, A García-Jerez, M Suarez, M A Santoyo y A Rodríguez-Castellanos (2011), “A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered médium”, *Geophysical Journal International*, No. 186, pp. 221–225. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x
- SESAME, European Research Project (2004), “Guidelines for implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations”, *WP12- Deliverable D23.12, European Commission -Research General Directorate*, Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
- Wathelet, M, J L Chatelain, C Cornou, G Di Giulio, B Guillier, M Ohrnberger y A Savvaidis (2019), “Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing” *Seismological Research Letters*, Vol. 9, No. 3, pp. 1878-1889, doi: 10.1785/0220190360.
- Williams, F, G Riquer, R Leyva y G Torres (2003), “Red acelerográfica de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río”, *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. León, Guanajuato, México. Sistema de Gestión de Información Sísmica de Veracruz. [www.iiuv.org/sgisv/documents/2003/Williams et al 2003.pdf](http://www.iiuv.org/sgisv/documents/2003/Williams%20et%20al%202003.pdf)
- Williams, F, F Lymaimanta, G Riquer, R Leyva y J F Lermo (2007), “Clasificación dinámica de terrenos de cimentación con fines de diseño sísmico en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río (ZCV)”, *XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica., Ixtapa Zihuatanejo, Guerrero*. Sistema de Gestión de Información Sísmica de Veracruz. [www.iiuv.org/sgisv/documents/2007/Williams et al 2007.pdf](http://www.iiuv.org/sgisv/documents/2007/Williams%20et%20al%202007.pdf)