

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA SIMPLIFICADA PARA ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA¹

Andrés Villarreal² y Luis E. Suárez³

Resumen: En este artículo se presenta el desarrollo de una metodología simplificada para realizar estudios de microzonificación sísmica. La metodología se considera simplificada porque a diferencia de un proyecto de microzonificación convencional, no requiere realizar campañas de ensayos geofísicos que conlleven fondos sustanciales. La metodología propuesta se basa en el uso de capas de suelo equivalentes. Esta consiste en representar un depósito de suelo de múltiples capas mediante otro de una sola capa equivalente, usando la fórmula del periodo natural fundamental de un depósito uniforme. Las capas de suelo equivalentes se definen con información proveniente de los periodos de un mapa de isoperiodos y la velocidad de ondas S obtenida de forma indirecta de un mapa de tipos de perfil de suelo. Como caso de estudio se aplicó la metodología desarrollada a la ciudad de Mayagüez, Puerto Rico. Uno de los aportes principales del estudio es que la metodología desarrollada se puede aplicar a otras localidades donde se cuente con la información de la clasificación sísmica de los tipos de suelo y sus periodos naturales. También para la ciudad de Mayagüez se generó en una plataforma de ArcGIS[®] un mapa de microzonificación sísmica donde los usuarios interesados pueden acceder a los parámetros que definen el espectro de diseño sísmico de una manera interactiva.

Palabras clave: capas de suelo equivalentes, espectros de diseño, microzonificación sísmica.

DEVELOPMENT OF A SIMPLIFIED METHODOLOGY FOR SEISMIC MICROZONATION STUDIES

Abstract: This article presents the development of a simplified methodology to perform seismic microzonation studies. The methodology is regarded as simplified, because, unlike a conventional microzonation project, it does not require to perform a series of geophysical tests which require substantial funds. The methodology proposed is based on the use of equivalent soil layers. It consists in representing a soil deposit with multiple layers by another deposit with a single equivalent layer, using the fundamental natural period formula for a uniform soil deposit. The equivalent soil layers are defined with the information provided by an isoperiod map and the shear wave velocities obtained indirectly from a map of soil class site. As case study, the methodology developed was applied to the city of Mayaguez, Puerto Rico. One of the main contributions of this project is that the methodology is applicable to other locations where the information available is limited to the class site classification of the soil profiles and its fundamental natural periods. Also a seismic microzonation map for the city of Mayaguez was generated in the ArcGIS platform, where the users can access the parameters that define the seismic design spectrum in an interactive way.

Key words: design spectra, equivalent soil layers, seismic microzonation

¹ Artículo recibido el 20 de diciembre de 2014 y aceptado para publicación el 2 de mayo de 2015.

² Estudiante graduado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Puerto Rico. E-mail: andres.villarreal@upr.edu

³ Catedrático, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Puerto Rico. E-mail: luis.suarez3@upr.edu

INTRODUCCIÓN

Debe aclararse que si bien existen varias definiciones de microzonificación sísmica, en este artículo se considera como el proceso de definir los espectros de diseño para distintas zonas de una ciudad o un municipio dado. El espectro de diseño sísmico (gráfico de pseudo-aceleración versus periodo natural) es todavía en la actualidad la herramienta más utilizada para el análisis y diseño sismo resistente de estructuras civiles. En el código “Uniform Building Code” UBC-97 (ICBO, 1997) que se usó oficialmente en Puerto Rico hasta finales del año 2010, se usaba un solo espectro de diseño para toda la Isla. Posteriormente, con el código “International Building Code” IBC-09 (ICC, 2009) en el que se basa el nuevo código actual vigente desde enero de 2011, los espectros de diseño cambian de sitio a sitio y en la práctica, de municipio a municipio. Esto es un gran avance dado que el riesgo sísmico no es el mismo, por ejemplo, para las ciudades de Mayagüez (ubicada en el oeste de Puerto Rico) y San Juan (situada en el este de Puerto Rico) debido a la mayor o menor cercanía a las fallas activas de uno u otro municipio. De acuerdo al código IBC-09, los espectros para los distintos tipos de perfil de suelo se obtienen modificando dos factores F_a y F_v con el espectro de diseño para roca (suelo B en la clasificación de NEHRP). Este procedimiento tiene las ventajas de ser muy simple y que puede ser aplicado a cualquier sitio donde el código tenga vigencia con solo conocer el tipo de perfil de suelo (llamado “clase site” en inglés). La desventaja es que el espectro modificado puede no reflejar bien la amplificación debido a las condiciones geológicas y geotécnicas locales, y en el peor caso puede subestimar las cargas sísmicas con la que se diseñan las estructuras. Esta incertidumbre puede remediarse si se efectúa una microzonificación sísmica para la zona geográfica de interés.

Usualmente la ejecución de un proyecto de microzonificación convencional requiere de fondos sustanciales. La razón principal es que para poder calcular los espectros de respuesta en la superficie de los distintos puntos en la zona de estudio se necesita conocer información detallada del perfil de las capas de suelo en cada sitio (hasta la roca madre o al menos hasta los primeros 100 pies de profundidad): esta incluye el espesor, el módulo de corte, el peso unitario, la razón de amortiguamiento y una descripción del tipo de material para cada capa. La cantidad de puntos depende de las diferencias entre las propiedades mencionadas de los depósitos de suelo y de la densidad deseada de espectros de diseño para la microzonificación. Esta información se puede obtener mediante ensayos geofísicos como aquellos conocidos en inglés como “down-hole”, “cross-hole”, SASW, etc. Sin embargo en muchas ciudades a nivel mundial no se cuenta con suficientes estudios para definir los modelos de depósitos de suelo requeridos para realizar una microzonificación convencional, y no se dispone de un presupuesto para este fin. En este artículo se presenta el desarrollo de una metodología simplificada para realizar estudios de microzonificación sísmica. La metodología se la define como simplificada porque no requiere la ejecución de ensayos geofísicos, los cuales usualmente son de costos significativos. La metodología propuesta se basa en el uso de una capa de suelo equivalente para representar un depósito de múltiples capas. Como es costumbre en ingeniería sísmica geotécnica se supone que los depósitos de suelo están formados por capas horizontales que se extienden sin límites en las direcciones horizontales. Para definir la capa equivalente se necesita conocer dos parámetros: la profundidad de la capa hasta la roca basal (o hasta un suelo muy competente) y un módulo de corte uniforme para el suelo. Esta información se puede extraer de forma indirecta de dos fuentes: de los llamados mapas de isoperiodos y de los mapas de tipos de perfil de suelo (los que se conocen en inglés como “class site”). Como la forma más común de definir los mapas de tipos de suelo es mediante un rango de velocidades de ondas S promedio (ASCE 7-05, 2006), la velocidad para el depósito equivalente se puede estimar de esta fuente. De un mapa de isoperiodos se conoce el periodo natural fundamental (el más alto) del depósito de suelo. Con la velocidad de onda S promedio y el periodo natural, de la fórmula para el periodo natural fundamental de un depósito de suelo uniforme (Kramer, 1996) se puede definir el espesor o profundidad de la capa equivalente. Una vez definidas las capas de suelo equivalentes se procede a realizar un análisis de respuesta de sitio de las diferentes zonas donde se desea definir los espectros de diseño. Para el cálculo de la respuesta sísmica (la aceleración absoluta en la superficie libre del depósito) se adoptó el programa EERA (Bardet et al., 2000) que es una implementación en Excel del conocido programa SHAKE (Schnabel et al., 1972).

Como caso de estudio para poder presentar un ejemplo de la microzonificación sísmica simplificada se ha seleccionado la ciudad de Mayagüez, la cual se sitúa en el extremo oeste de Puerto Rico. La isla de Puerto Rico está en el Mar Caribe localizada entre las latitudes 18°N y 18.5°N y las longitudes 65.5°O y 67.5°O, y se ubicada en una zona de mucha actividad tectónica, expuesta a eventos como deslizamientos de tierra, tsunamis y terremotos. La ciudad de Mayagüez en particular experimentó en octubre de 1928 uno de los sismos más destructivos del cual se tiene registro en Puerto Rico (Pacheco y Sykes, 1992).

EL MÉTODO DE LAS CAPAS DE SUELO EQUIVALENTES

Explicación del método

El método de capas de suelo equivalentes es una metodología simplificada que consiste en representar las propiedades dinámicas y geométricas de un depósito de suelo en un sitio específico mediante una única capa de suelo equivalente. La capa de suelo equivalente se obtiene a partir de la ecuación que calcula el periodo natural fundamental de un depósito de suelo, descrita en la literatura de ingeniería geotécnica sísmica como (Kramer, 1996):

$$T = 4H/V_s \quad (1)$$

donde H es el espesor del depósito de suelo y V_s es la velocidad de propagación de las ondas de corte u ondas S. La fórmula supone que la capa de suelo es uniforme, se extiende hacia el infinito en las direcciones horizontales, y termina en una roca rígida en el fondo del depósito.

De un mapa de isoperiodos se extraen los periodos naturales fundamentales del suelo en puntos específicos deseados. Complementariamente, para el análisis dinámico hace falta conocer la profundidad H hasta la roca o suelo competente. Esta información se puede obtener de forma indirecta a partir de un mapa de tipos de suelo, donde los suelos se dividen en tipo A, B, C, D o E según la clasificación de NEHRP (ASCE 7, 2005). Para definir el tipo de suelo, en la práctica los códigos usan la velocidad de ondas S de las capas de suelo como un promedio ponderado hasta los primeros 100 pies (30 m) de profundidad. De acuerdo a la clasificación de perfiles de suelo, por ejemplo, un suelo tipo D es aquel donde: $600 \text{ ft/s} \leq V_s \leq 1,200 \text{ ft/s}$.

De esta forma es posible definir para un sitio determinado un valor de V_s para el límite inferior y otro para el límite superior. Si se conocen la velocidad V_s y el periodo natural fundamental T , con la ecuación (1) se puede determinar la profundidad H de una capa de suelo equivalente a las múltiples capas que hay en el sitio. La capa es *equivalente* en el sentido de que tiene el mismo periodo natural y la misma velocidad de onda de corte promedio que las capas reales. Como hay dos límites de velocidades de onda V_s , el procedimiento debe repetirse para obtener otra capa equivalente. La capa equivalente que mejor representa el perfil de suelo del sitio se supone que se encuentra entre las dos capas equivalentes obtenidas.

Validación y calibración del método

La validación del método aproximado consistió en comparar la respuesta sísmica de perfiles de suelos en varios sitios definidos por varias capas, contra la respuesta de las capas equivalentes propuestas para esos mismos sitios. La respuesta dinámica del suelo tiene en cuenta aproximadamente efectos no lineales mediante el Método Lineal Equivalente que está incorporado en el programa EERA (Bardet et al., 2000).

Dado que el método propuesto puede ser utilizado para otras localidades diferentes a la zona de estudio, la validación se realizó usando perfiles de suelo hipotéticos (o sea no necesariamente para Mayagüez). Se generaron entonces perfiles bases (o hipotéticos) para la validación, en los cuales por cuestiones prácticas se definieron sus propiedades de forma arbitraria, es decir, se escogieron unos valores de velocidad de onda de corte para las capas de suelo de tal forma que los clasificaran como tipo C, D o E. Los espesores, pesos unitarios y amortiguamientos de las capas se mantuvieron constantes para los diferentes tipos de suelo. Como el suelo tipo A es una roca muy competente y usualmente no se encuentra en Puerto Rico, este perfil no se tuvo en consideración. Del mismo modo, tampoco se consideró para la validación el suelo tipo F, ya que este es un suelo orgánico o propenso a licuación y el código exige un estudio sísmico específico para este suelo (no se definen espectros para esta clase). El suelo tipo B es la premisa del estudio y se considera que el espectro que plantea el código para este suelo es correcto, y por lo tanto no se utiliza para la validación. En este sentido, se utilizaron para la validación perfiles de suelo clasificados como tipo C, D y E. Como ejemplo, los datos del primer perfil base se muestran en la Tabla 1 y los datos de las capas de suelo equivalentes que los representan se indican en la Tabla 2. En el caso particular en que un suelo clasifica como tipo E, como solo se cuenta con un límite superior de V_s , se considera para la validación que un valor razonable del límite inferior de la velocidad de onda S es 300 ft/s.

Una vez definidas las propiedades de los perfiles de suelo y sus respectivas capas equivalentes, se procedió a ingresar los datos en el programa EERA como valores de entrada. Para representar un depósito de suelo con un modelo tipo SHAKE el usuario tiene la opción de definir la roca basal como infinitamente rígida o flexible. Es

conveniente usar la segunda opción pues la primera tiende a sobrestimar la respuesta debido al enfriamiento artificial de las ondas sísmicas creado por un borde inferior ficticio. No obstante, esto obliga a asignarle valores a las propiedades de esta roca flexible, en especial a la velocidad de onda V_s . En el caso de las capas equivalentes, para definir la velocidad V_s en la roca debajo de la capa más profunda se utilizó un proceso de calibración. Se fue variando el valor de V_s en la roca para los tipos de suelo C, D y E por un factor α , de tal forma que se ajustara la respuesta de las capas equivalentes a la de los perfiles base (o sea a la respuesta considerada exacta). Cuando la capa equivalente representa un suelo clasificado como tipo C, el factor α a utilizar es 2.5; para las capas equivalentes de un suelo tipo D el valor de α es de 3.4; y para un suelo tipo E representado con capas equivalentes, se recomienda tomar el factor α igual a 4.2. Los factores α obtenidos poseen una relación lineal (véase la Figura 1), lo cual se atribuye al hecho de que un suelo tipo C es más rígido que uno tipo D, y este último más rígido que uno tipo E.

Tabla 1: Primer perfil base de suelo para la validación del método de capas de suelo equivalentes.

Espesor (ft)	Peso Unitario (lb/ft ³)	Suelo Tipo C V_s (ft/s)	Suelo Tipo D V_s (ft/s)	Suelo Tipo E V_s (ft/s)
3	100	950	665	325.85
13	110	1750	1225	600.25
5	120	1300	910	445.9
6	110	1950	1365	668.85
16	90	1650	1155	565.95
18	105	1100	770	377.3
9	110	850	595	291.55
7	120	1500	1050	514.5
11	110	2000	1400	686
12	130	3250	2275	1114.75
V_s (ft/s) - Código		1470.21	1029.15	504.28
V_s (ft/s) - Aritmético		1691.50	1184.05	580.18
Periodo Natural Fundamental (s)		0.28	0.40	0.81
V_s (ft/s) en la Roca		4875.00	3413.00	1672.00

Tabla 2: Propiedades de las capas equivalentes que representan el primer perfil base.

Tipo de Suelo	Espesor H (ft)		Velocidad de Onda de Corte (ft/s)		Periodo Natural Fundamental (s)
	Límite Inferior	Límite Superior	Límite Inferior	Límite Superior	
C	84	175	1200	2500	0.28
D	60	120	600	1200	0.40
E	60.75	121.5	300	600	0.81

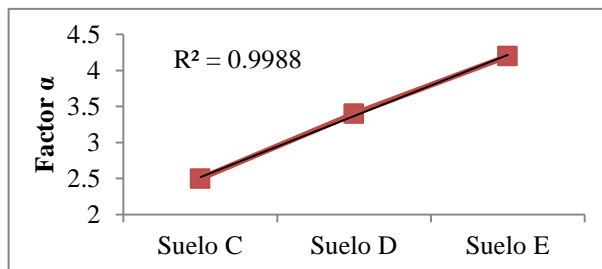


Figura 1: Factores α para los tipos de suelo C, D y E en la calibración de capas equivalentes.

Se mencionó que cuando se calcula la respuesta sísmica de sitio con un programa tipo SHAKE, el comportamiento

no lineal del suelo se tiene en cuenta mediante el Método Lineal Equivalente. Este método requiere conocer las denominadas *curvas de degradación*, vale decir la variación del módulo de corte G y de la razón de amortiguamiento ξ de cada capa con la distorsión angular γ (Schnabel et al., 1972). Estas curvas dependen del tipo de material de cada capa. El programa EERA tiene disponible curvas de $G = f(\gamma)$ y $\xi = f(\gamma)$ para tres materiales. Para definir el tipo de material de suelo requerido para asignar las curvas de degradación, de la calibración se obtuvo que para un suelo clasificado como tipo C, el material a utilizar es el tipo 3 (roca); para un suelo clasificado como tipo D el material a utilizar es el tipo 1 (arcilla); y para un suelo clasificado como tipo E el material a utilizar es también el tipo 1 (arcilla). Los tres tipos de materiales incorporados en el programa EERA, definidos por Sun et al. (1988), Seed et al. (1986) y Seed & Idriss (1970) son arcilla, arena y roca, que corresponden a los tipos 1, 2 y 3 respectivamente.

El espectro de diseño sísmico se define como la curva de pseudo-aceleraciones versus periodo natural que en su forma determinística se puede obtener como el promedio suavizado (sin picos y valles) de los espectros de respuesta de varios registros de aceleraciones. Se construye con una línea suavizada que envuelva los valores máximos de las (seudo) aceleraciones de un oscilador de un grado de libertad en función de su periodo natural, teniendo en cuenta efectos de amplificación de sitio. Para obtener un espectro de respuesta se necesita usar como excitación para el oscilador la aceleración absoluta en la superficie libre del suelo. La respuesta de un depósito de suelo varía dependiendo del sismo al que esté sometido con el problema que los terremotos que ocurrirán en el sitio son inciertos. Por tal motivo, para tener en cuenta los efectos causados por diferentes sismos, en el proceso de validación del método la respuesta sísmica se calculó para siete sismos históricos a nivel mundial, como se explica más adelante. Los sismos escogidos tuvieron como criterio de selección poseer una magnitud mayor a 5 y valores de PGA mayores de 0.2g. En el caso del primer perfil base y sus respectivas capas equivalentes, los resultados de la validación, en términos de espectros de respuesta en la superficie, se exponen en las Figuras 2, 3 y 4 para los suelos tipo C, D y E, respectivamente. Estos espectros están definidos usando una razón de amortiguamiento $\xi = 0.05$ para el oscilador y usando como excitación la aceleración superficial obtenida al aplicar el registro del sismo de San Salvador de 1986 al depósito de suelo.

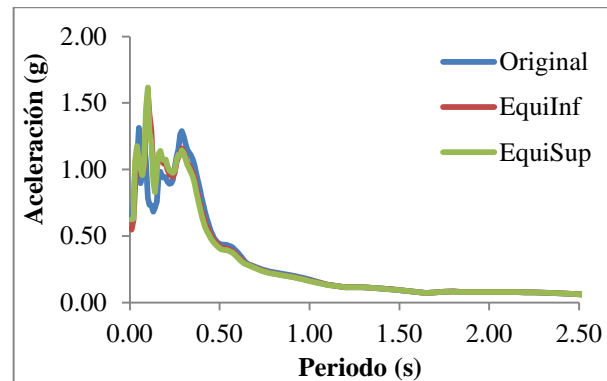


Figura 2: Espectros de respuesta del suelo tipo C del perfil base 1, debido al sismo de San Salvador de 1986.

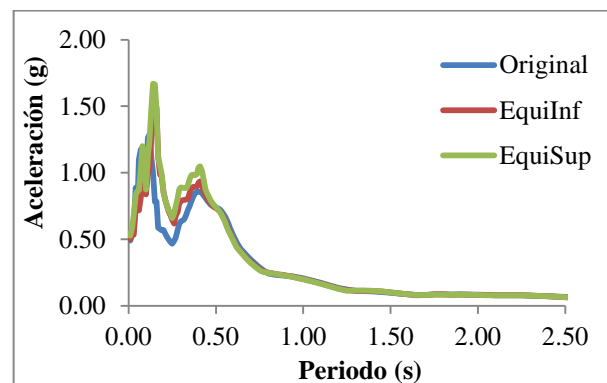


Figura 3: Espectros de respuesta del suelo tipo D del perfil base 1, debido al sismo de San Salvador de 1986.

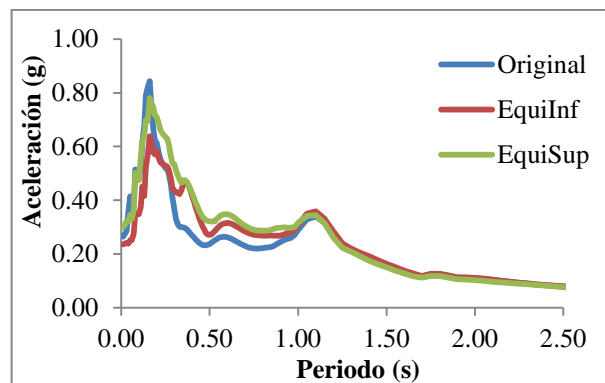


Figura 4: Espectros de respuesta del suelo tipo E del perfil base 1, debido al sismo de San Salvador de 1986.

METODOLOGÍA

A continuación se describe de manera general la metodología aproximada que se propone para realizar el estudio de microzonificación sísmica. Luego se explican los detalles de su aplicación a un caso específico.

Caracterización de la zona de estudio

Consiste en establecer zonas con características similares de las propiedades del suelo, las cuales sirven de base para la definición de lugares donde se espera una respuesta sísmica del suelo parecida. Durante la caracterización es necesario describir las fallas tectónicas y la actividad sísmica de la zona de estudio, la geología, topografía y la hidrología. También se debe recopilar la máxima cantidad de estudios geotécnicos y ensayos geofísicos disponibles para el área de estudio.

Selección de registros de aceleraciones

Para poder simular los diferentes escenarios de la respuesta sísmica en la superficie de los depósitos de suelo se deben seleccionar los registros de aceleraciones en la roca. La cantidad de registros seleccionados para el cálculo debe ser un número razonable que permita representar diferentes movimientos fuertes. El código IBC-09 y otros (ASCE 7, por ejemplo) recomienda que para el cálculo de la respuesta dinámica de estructuras en el tiempo se utilice un total de siete terremotos (y se diseñe con la respuesta máxima). Dichos terremotos no pueden ser arbitrarios sino que deben ser representativos a unos que puedan ocurrir en el sitio por lo que conviene que se hayan originado en fallas sísmicas cercanas al área de estudio. Como ocurre con frecuencia en muchas zonas sísmicas donde no hay disponible registros de movimientos fuertes, se puede seleccionar de bases de datos unos registros originados en fallas similares y a distancias y profundidades comparables.

Aplicación del método de las capas equivalentes

El método desarrollado en este trabajo es recomendado para sitios con carencia de información suficiente sobre la geología local proveniente de ensayos geofísicos y donde no se dispone de un patrimonio económico para realizar una campaña para obtener las propiedades de las capas de suelo. El objetivo es determinar los espectros de diseño para distintas zonas de una ciudad para la cual se conoce y se supone correcto el espectro en roca provisto por un código u otra fuente. El método de capas equivalentes de suelo permite obtener la respuesta sísmica de un sitio (aceleración en la superficie) y con esta definir un espectro de diseño similar al especificado por el código para roca. Los resultados son similares a los de la metodología convencional más precisa, pero sin los costos y el trabajo asociado.

Análisis de la respuesta dinámica del suelo

Para efectuar el análisis dinámico de depósitos de suelo para predecir los movimientos del terreno, en el presente estudio se adoptó el método basado en la teoría de propagación de ondas en suelos estratificados y amortiguados.

Las capas de suelo se simulan con modelos continuos unidimensionales y el análisis se realiza en el dominio de la frecuencia. La no linealidad en el comportamiento de los suelos que ocurre cuando estos están sometidos a sismos moderados y fuertes se tiene en cuenta de manera aproximada mediante el Método Lineal Equivalente. Esta es la metodología que usa el programa EERA y que fue originalmente propuesta por Schnabel et al. (1972). Adicionalmente, se evalúan deformaciones y esfuerzos dinámicos en el suelo e indirectamente posibles efectos de licuación. Existe un procedimiento alternativo que es más preciso, especialmente para movimientos sísmicos de gran intensidad, y que consiste en efectuar una integración paso-a-paso en el tiempo de las ecuaciones de movimiento de un modelo discreto unidimensional del depósito. Si bien el método de las capas equivalentes también se podría aplicar con este segundo procedimiento, en el estudio que aquí se presenta se aplicó la primera metodología.

Espectros de diseño

Examinando los resultados de la respuesta dinámica del suelo se proponen espectros de diseño para diversas zonas donde la respuesta sísmica del sitio es similar. El espectro de diseño planteado se construye siguiendo un esquema similar al que se usa para definir los espectros de diseño especificados en el código IBC-09. Estos espectros se definen con cinco parámetros: las aceleraciones espectrales de diseño para periodos cortos y largos, S_{DI} y S_{DS} respectivamente, el periodo T_0 donde inicia la parte plana del espectro, el periodo corto o donde finaliza la parte plana del espectro T_s , y el periodo largo T_L a partir del cual la curva desciende más rápidamente.

Mapas de microzonificación

Para tener fácil acceso a los resultados del estudio de microzonificación se generaron mapas de microzonificación sísmica. La plataforma de información geográfica ArcGIS (ESRI, 2014) permite generar los mapas que contienen información sobre los espectros de diseño y otra información relevante para cada sitio.

CASO DE APLICACIÓN

Para presentar un ejemplo de la microzonificación sísmica simplificada se adoptó como área de estudio la ciudad de Mayagüez, situada en el extremo oeste de Puerto Rico, sede de unos de los Recintos Universitarios de la Universidad de Puerto Rico. La secuencia de pasos y consideraciones que hay que tomar en cuenta para completar el proceso se discute a continuación.

Caracterización de la ciudad de Mayagüez

La caracterización de la ciudad de Mayagüez consistió en describir su geografía, la sismicidad de la zona, la geología general, topografía, y una recopilación de información sobre estudios previos relacionados a la microzonificación. Dentro de los estudios más relevantes se tienen los resultados del trabajo de Pando et al. (2006), donde se elaboró una base de datos digital con información principalmente geotécnica y geofísica de la ciudad de Mayagüez.

Los periodos fundamentales del suelo fueron tomados de un mapa de isoperiodos (véase la Figura 5a) preparado para la ciudad de Mayagüez por Ritta (2009). En este trabajo se efectuaron mediciones de vibraciones ambientales en 134 sitios en la ciudad de Mayagüez. Utilizando la técnica de Nakamura o del cociente espectral H/V se determinó el periodo natural fundamental de los depósitos de suelo en estos sitios.

La otra información requerida por el método propuesto es una descripción del tipo de perfil de suelo en la zona de estudio, de acuerdo a una clasificación como la NEHRP basada en la velocidad de onda S promedio. Llavona (2004) desarrolló un mapa de tipos suelos del municipio de Mayagüez, según la clasificación de suelo de NEHRP (perfiles de suelo A, B, C, D, E o F). Dicho mapa (Figura 5b) fue obtenido usando la información de diversos estudios geotécnicos.

Una vez caracterizada la zona de estudio se establecieron ciertas zonas de la ciudad que tuviesen una posible respuesta sísmica similar del suelo. Utilizando el programa ArcGIS (ESRI, 2014) como herramienta en la toma de decisiones se delimitaron zonas donde la respuesta sísmica del suelo se obtiene a partir de la información de estudios geofísicos, mapas de tipo de suelo e isoperiodos, pruebas geotécnicas, y datos del periodo fundamental del suelo (véase la Figura 6).

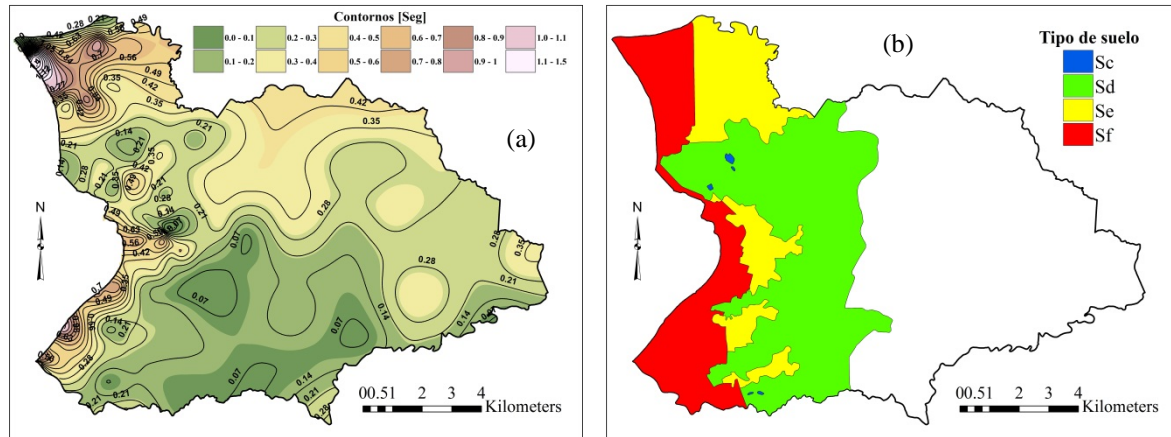


Figura 5: (a) Mapa de isoperiodos de la ciudad de Mayagüez, adaptado de Ritta (2009). (b) Mapa de tipos de suelo de la ciudad de Mayagüez, adaptado de Llavona (2004).

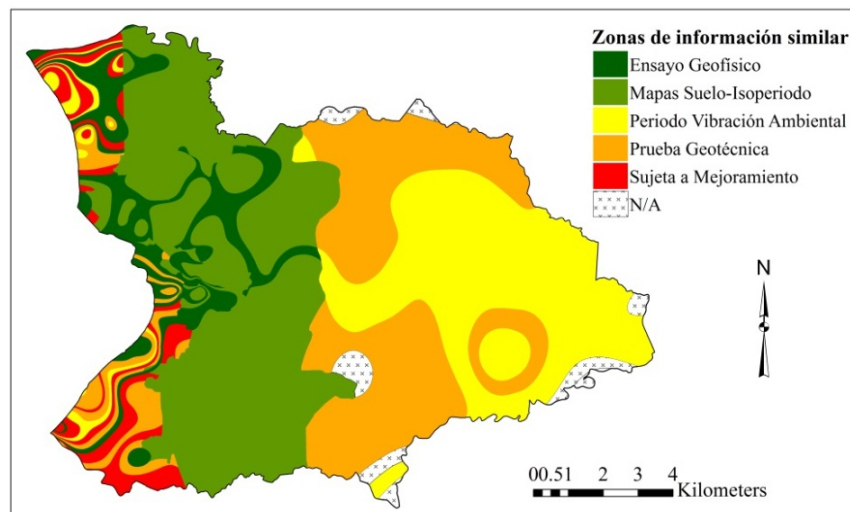


Figura 6: Mapa de Mayagüez con zonas de similares fuentes de información.

Selección de registros de aceleraciones

En Puerto Rico no se cuenta con una base de datos de sismos registrados de alta magnitud y alto PGA. Por lo tanto, para efectos de este trabajo fue necesario seleccionar acelerogramas de sismos históricos a nivel mundial. Basado en un estudio por Martínez et al. (2001), se seleccionaron siete registros de sismos históricos para el análisis, los cuales son representativos a unos que pudieran ocurrir en fallas activas cercanas al área de estudio (o sea, que sea causado por una falla sísmica similar, a una distancia epicentral similar, y demás). Como la hipótesis del método propuesto es que el espectro de diseño del código IBC-09 para roca B es la información básica y confiable, y el análisis de respuesta de sitio con el modelo de SHAKE es en el tiempo, se requiere que los acelerogramas escogidos sean compatibles con el espectro de diseño para la ciudad de Mayagüez. En otras palabras, los acelerogramas seleccionados deben producir un espectro de respuesta similar al de diseño de IBC-09 para suelo tipo B. Para lograr la compatibilidad de los registros de aceleraciones con el espectro de diseño, se usó un programa en Matlab desarrollado por Montejó y Suárez (2013). Este programa utiliza la transformada de “wavelet” para modificar los sismos en el dominio de la frecuencia y hacerlos compatibles al espectro escogido. Luego del procesamiento de los registros sísmicos para lograr la compatibilidad, se debe efectuar lo que se conoce como una “corrección de línea de base” para que la velocidad y desplazamiento al final del registro sean iguales a cero (Suárez & Montejó, 2007). La

Tabla 3 lista las principales características de los historiales de aceleración de los sismos seleccionados originales y también de los compatibles y corregidos.

Tabla 3: Características de los sismos históricos seleccionados.

Nombre	Estación	Magnitud	Profundidad (km)	Distancia Epicentral (km)	PGA (g) Original	PGA (g) Compatible
Imperial Valley 05/19/40	117 El centro Array #9	7.0	8.8	13.0	0.313	0.378
San Salvador 10/10/86	Centro Invest. Geotécnicas	5.8	10.9	6.3	0.875	0.433
México, Victoria 06/09/80	6604 Cerro Prieto	6.4	11	33.7	0.587	0.547
Loma Prieta 10/17/1989	Olema-Point Reyes	6.9	17.5	117.1	0.161	0.481
Kocaeli, Turquía 08/17/99	Sakarya	7.5	15	33.2	0.376	0.343
San Fernando 02/09/71	Hollywood Store, Sta. 135	6.6	13	22.8	0.210	0.372
Oroville 08/01/75	1051 Seismo-graph Station	5.9	5.5	8.0	0.091	0.384

Aplicación del método de las capas equivalentes

Como se muestra en la Figura 6, se delimitaron zonas donde se espera una respuesta sísmica similar del suelo. El método de capas de suelo equivalentes se aplicó a las zonas donde la información similar proviene de mapas de tipo de suelo, mapas con los periodos naturales (i.e. mapas de isoperiodos) y pruebas geotécnicas. En las zonas donde hay información de pruebas geotécnicas como los valores “*N*” del ensayo de penetración estándar, se usó esta fuente para clasificar los perfiles de suelo según las provisiones NEHRP. En las zonas de Mayagüez donde se dispone de información proveniente de ensayos geofísicos, se cuenta con todos los datos necesarios para establecer los perfiles de suelo en EERA (este es el caso ideal y aquí no hace falta aplicar el método propuesto). El resultado de esta etapa de la metodología fue la definición de depósitos de suelo con una sola capa, con espesores y velocidades de ondas *S* obtenidos mediante el método propuesto. Los valores de los pesos unitarios totales de las capas de suelo equivalentes fueron tomados de información de pruebas geotécnicas aledañas según la base de datos preparada por Pando et al. (2006) para la ciudad de Mayagüez.

Análisis de la respuesta dinámica del suelo

Con los perfiles de suelo y los parámetros de entrada ya ingresados al programa EERA, el paso siguiente fue correr el programa para calcular los registros de aceleraciones absolutas en la superficie libre. Con estos se procedió a calcular los espectros de respuesta para cada perfil de suelo y para cada uno de los siete registros de aceleraciones compatibles con el espectro de diseño del código IBC-09 para roca B. Cabe mencionar que las razones de amortiguamientos para las distintas capas de suelo fueron establecidas mediante las curvas de degradación asignadas según los tipos de materiales incorporadas en el programa EERA.

Espectros de diseño

Una vez obtenidos y superpuestos los siete espectros de respuesta para cada sitio, se procedió a definir los espectros de diseño para la ciudad de Mayagüez. Para su definición, además de cumplir con la condición que cubra todos los espectros de respuesta, se usó la forma estándar con la cual se definen los espectros de diseño en las provisiones de ASCE 7-10 (ASCE, 2013) y en el código IBC-09. La Figura 7 muestra los espectros de respuesta y el espectro de diseño para un caso donde hay disponible datos obtenidos de un ensayo geofísico. En este ejemplo se usaron los datos de un ensayo “down-hole” realizado las cercanías del edificio de Biología de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez (UPR-M).

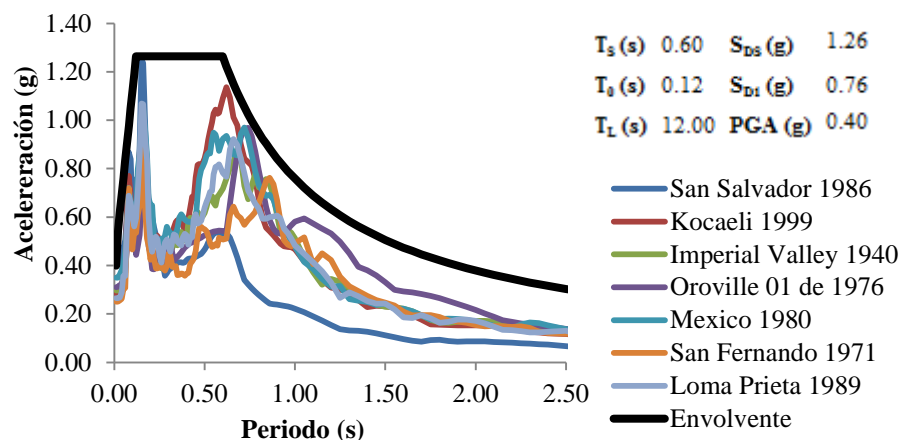


Figura 7: Espectros de respuesta y de diseño con los datos de un ensayo “down-hole” en el Departamento de Biología de UPR-M.

Cuando se aplica el método de capas de suelo equivalentes para proponer espectros de diseño, hay que tener en cuenta que se está utilizando un rango de velocidades de onda de corte por cada clasificación de tipo de suelo (hay un límite inferior y uno superior). Es razonable esperar que la respuesta real del suelo esté acotada entre las respuestas del límite inferior y superior de las capas de suelo equivalentes.

Para los siete sismos históricos y para el modelo de la capa equivalente inferior se calculan los espectros de respuestas en la superficie y se traza un espectro envolvente como lo muestra la Figura 8 a la izquierda. Se repite este proceso con la capa equivalente superior (véase la Figura 8 a la derecha). Usando los dos espectros envolventes de la capa superior e inferior se calcula el promedio de las aceleraciones espectrales para cada periodo natural. El espectro de diseño se genera entonces como una envolvente “suavizada” del espectro promedio. En la Figura 9 se presenta el espectro de diseño para una capa de suelo equivalente clasificada como tipo D con un periodo fundamental de 0.40 segundos, y se muestra el espectro de aceleraciones promedio entre los de las capas equivalentes inferior y superior.

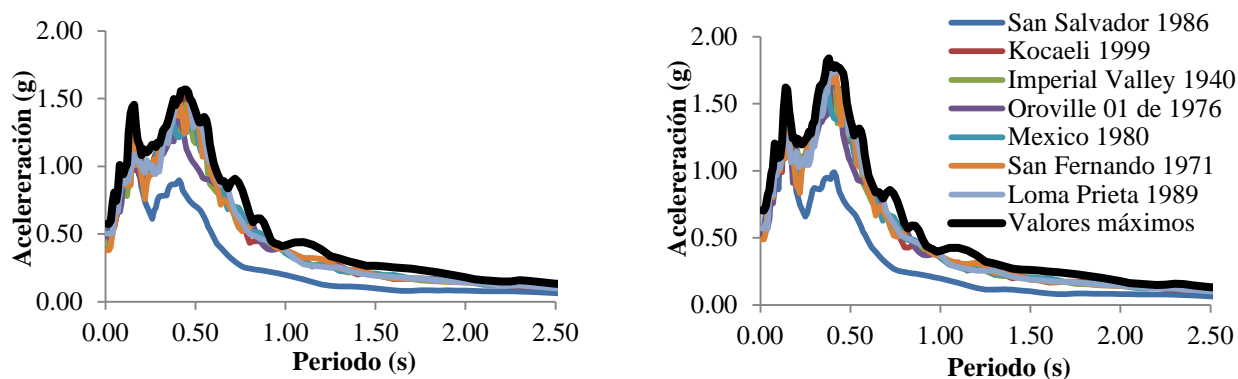


Figura 8: Espectros de respuesta y envolvente para las capas equivalente inferior y superior para un suelo D con un periodo natural de 0.40 segundos.

Como resultado de la aplicación del método de las capas de suelo equivalentes al municipio de Mayagüez, Puerto Rico, se han elaborado una serie de tablas que contienen un resumen de los parámetros que permiten definir los espectros de diseño para depósitos de suelo con diversos periodos naturales. Las tablas fueron construidas para periodos fundamentales del suelo que varían desde 0.05 hasta 1.5 segundos con un intervalo constante de 0.05 segundos y para los tipos de suelo C, D y E clasificados según las provisiones de NEHRP.

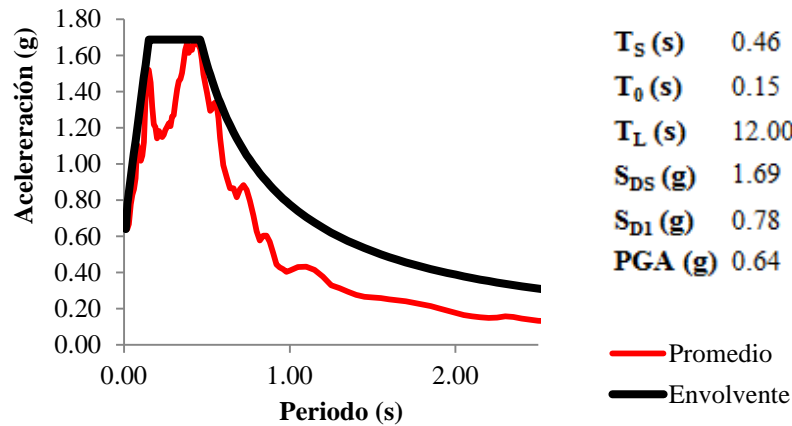


Figura 9: Espectro de diseño propuesto para un suelo tipo D con periodo natural de 0.40 segundos obtenido con el método de las capas de suelo equivalentes.

Mapas de microzonificación

El paso final de la metodología propuesta consiste en la elaboración de mapas de microzonificación. Para que los usuarios puedan acceder a los espectros de diseño propuestos en áreas de interés específicas y al resto de la información disponible en forma sencilla y cómoda, se incorporó toda la información obtenida en un programa de Sistema de Información Geográfica. Se decidió implementar todo el proceso de microzonificación sísmica en la plataforma ArcGIS (ESRI, 2014). En la Figura 10 se presenta el mapa de microzonificación sísmica para la ciudad de Mayagüez, Puerto Rico tomado de la pantalla del programa ArcGIS. El mapa indica zonas detalladas con las diferentes respuestas sísmicas. En total el mapa incluye 23 espectros de diseño obtenidos usando datos de ensayos geofísicos distribuidos para 53 sitios, y 49 espectros de diseño obtenidos con el método de capas equivalentes definidos para 265 sitios de la ciudad de Mayagüez.

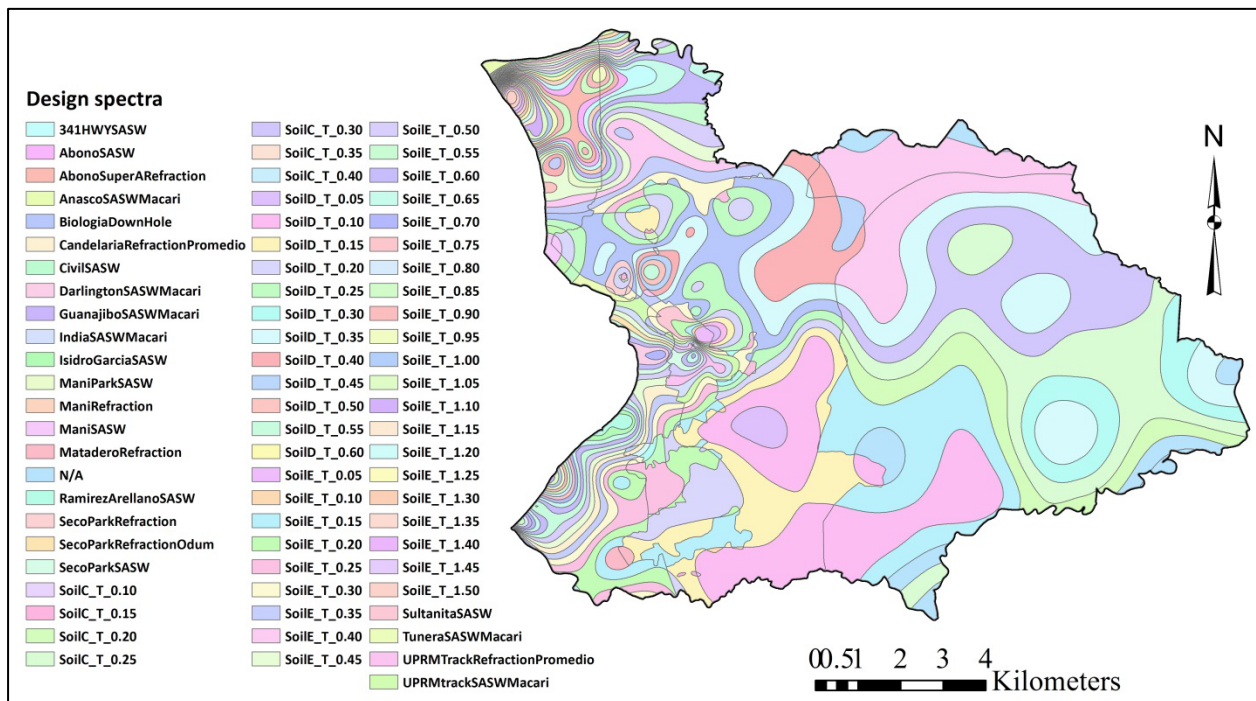


Figura 10: Mapa de Microzonificación sísmica para la ciudad de Mayagüez, Puerto Rico.

Un caso especial se presenta en aquellos sitios donde en el mapa de tipos de suelo el perfil de suelo está clasificado como F y donde no hay información disponible de estudios geofísicos, pruebas geotécnicas, etc. Como se mencionó anteriormente, los códigos no proveen un espectro de diseño para este tipo de suelo debido a que pueden ser propensos a experimentar fallas durante un movimiento sísmico, por ejemplo por licuación. En este caso se tomó la decisión de considerar que el suelo es de tipo E, pero se aclara que esto está sujeto a que se implemente un proceso de mejoramiento del suelo. En la Figura 6 se indicaron zonas en donde los resultados del mapa de microzonificación están sujetos al mejoramiento del suelo. La condición para poder usar los espectros de diseño propuestos en las zonas sujetas a mejoramiento es que el suelo clasificado como tipo F sea mejorado, por lo menos, a uno tipo E mediante alguna de las técnicas de mejoramiento del suelo como compactación dinámica, vibro flotación, inyecciones de compensación, etc. (Kramer, 1996).

Es necesario aclarar que en el presente estudio de microzonificación no se tomó en cuenta la posible amplificación de las ondas sísmicas (y su efecto en los espectros) debido a la topografía local. Se sabe que las colinas, taludes y otras irregularidades topográficas pueden amplificar aún más los movimientos sísmicos (Cauzzi et al., 2012) pero su estudio se sale de los objetivos de este trabajo.

COMPARACIÓN ENTRE LOS ESPECTROS PROPUESTOS Y DEL CÓDIGO IBC-09

Con el fin de estudiar los efectos de amplificación (o eventual atenuación) de la respuesta sísmica por los suelos en la ciudad de Mayagüez, se compararon los espectros de diseño propuestos con los sugeridos por el código IBC-09 para los suelos tipo C, D y E. A modo de ejemplo se presentan tres espectros de diseño por tipo de suelo: uno de ellos es el prescrito por el código IBC-09 y los otros dos son resultado del presente estudio de microzonificación. En los tres casos se escogió un espectro obtenido con el método de las capas equivalentes y otro definido usando los datos de un ensayo geofísico (i.e. donde no fue necesario aplicar el método propuesto). Estos dos últimos espectros no son para el mismo sitio geográfico, pero el tipo de suelo sí es el mismo para los tres espectros.

En la Figura 11 se presenta el espectro de diseño del código IBC-09 para un suelo tipo C junto con dos espectros propuestos para una zona de la ciudad de Mayagüez donde el suelo se clasificó como tipo C. Uno de los espectros propuestos fue obtenido usando los datos de un ensayo geofísico (una prueba de refracción sísmica) realizado por Lugo (2007) para el sitio conocido como El Matadero. El otro espectro fue obtenido con el método de las capas equivalentes, utilizando los datos de una capa de suelo equivalente en un sitio del barrio Miradero de Mayagüez en donde el suelo está clasificado como tipo C y el mapa de isoperíodos indica un período natural de 0.30 segundos.

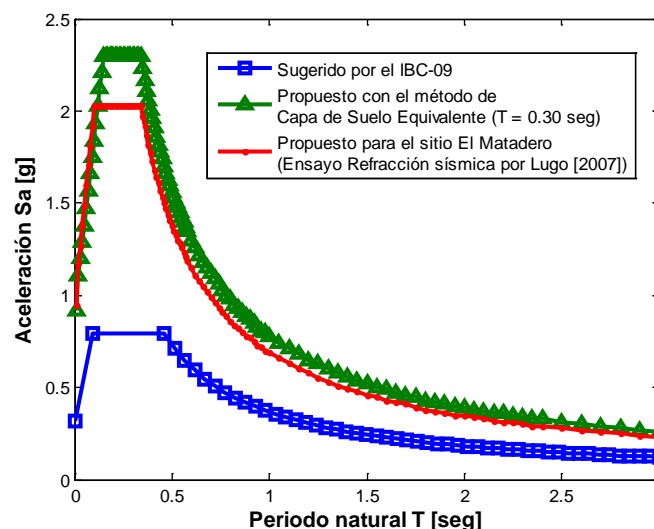


Figura 11: Comparación de espectros de diseño propuestos con el sugerido por el código IBC-09 para un suelo tipo C.

Análogamente, las Figuras 12 y 13 muestran el espectro del código junto con otros dos espectros de diseño propuestos en este proyecto, para los suelos tipo D y E respectivamente. Para la comparación de los espectros de diseño donde el suelo se clasifica como tipo D (Figura 12), se tomó para el espectro generado usando los datos de un ensayo geofísico consistente en una prueba de refracción sísmica realizada por Odum (2007) en el sitio del estacionamiento El Seco. Para el espectro de diseño obtenido con el método de las capas equivalentes se utilizaron los datos de una capa de suelo equivalente en un sitio del barrio Miradero donde el suelo está clasificado como tipo D y el mapa de isoperiodos indica un periodo natural de 0.55 segundos. Para presentar la comparación de los espectros de diseño en un caso donde el suelo se clasifica como tipo E (Figura 13), para uno de los espectros propuestos se usaron los datos de un ensayo geofísico SASW realizado por Macari (1994) en el sitio del Edificio Darlington. Para el otro espectro de diseño propuesto y obtenido con el método de las capas equivalentes se utilizaron los datos de una capa de suelo equivalente en un sitio del centro de Mayagüez donde el suelo está clasificado como tipo E y el mapa de isoperiodos indica un periodo natural de 0.70 segundos.

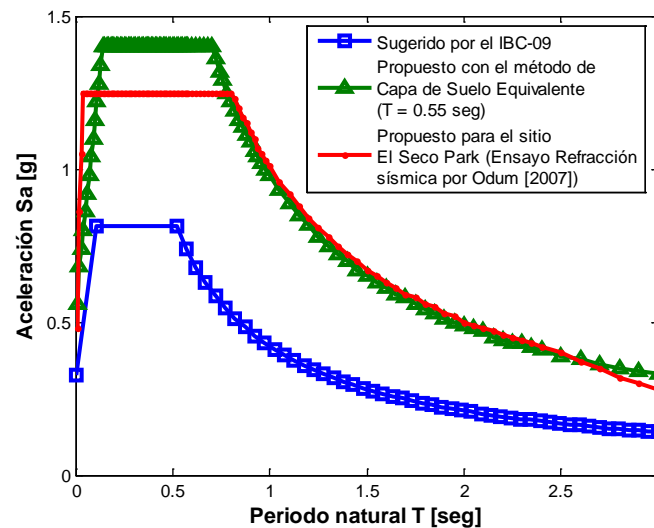


Figura 12: Comparación de espectros de diseño propuestos con el sugerido por el código IBC-09 para un suelo tipo D.

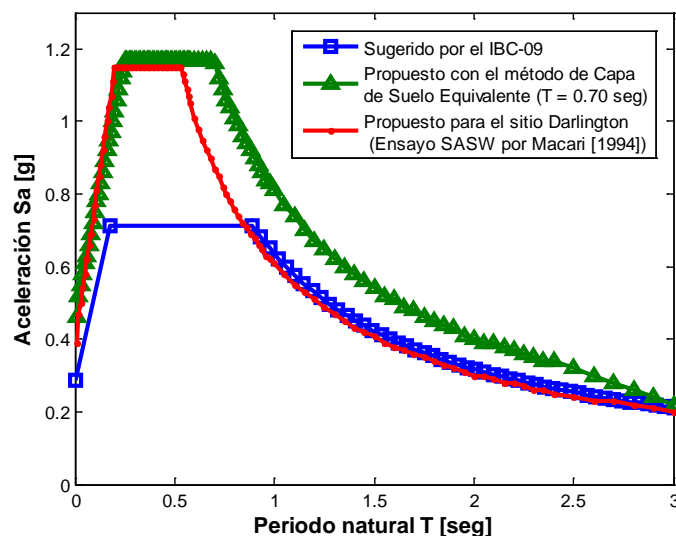


Figura 13: Comparación de espectros de diseño propuestos con el sugerido por el código IBC-09 para un suelo tipo E.

Es evidente de las tres figuras anteriores que los espectros producidos en este estudio de microzonificación predicen una aceleración pico del suelo (i.e. para $T = 0$) y aceleraciones espectrales (para $T > 0$) mayores a las que se obtienen usando los espectros genéricos del código IBC-09 para el mismo tipo de suelo. Estas diferencias son de esperar porque los espectros de código tratan de tener en cuenta de una manera simple la modificación de la aceleración en la superficie debido a las condiciones geológicas locales. En contraste, en una microzonificación se tiene en cuenta las propiedades dinámicas particulares de cada sitio, en especial la influencia de los periodos naturales del depósito de suelo y su interacción con los movimientos sísmicos.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presentó una metodología simplificada para realizar estudios de microzonificación sísmica, esto es para obtener espectros de diseño específicos para una zona de una ciudad o municipio. Para verificar la metodología y mostrar un ejemplo de aplicación se escogió el municipio de Mayagüez, ubicado en el área oeste de Puerto Rico. El método se basa en representar los depósitos de suelos de distintos sitios en una determinada localidad mediante capas de suelo equivalentes. Para definir las capas de suelo equivalente se necesita conocer la clasificación sísmica del tipo de suelo (i.e., A, B, C, D y E según NEHPR) y el periodo natural fundamental del depósito. Un dato básico para realizar la microzonificación es el espectro de diseño para roca (o perfil de suelo B); se supone que este espectro es lo suficientemente confiable y preciso. Una vez que el método propuesto fue debidamente validado y calibrado, se usó para obtener la aceleración en la superficie y su respectivo espectro de respuesta en diferentes lugares de la zona de estudio donde no se contaba con información de estudios geofísicos. En aquellos lugares en donde se disponía de información completa sobre las capas de suelo, se usó la misma para calcular la respuesta sísmica del sitio. El espectro de diseño se definió usando la envolvente de los espectros de respuesta de siete sismos históricos probables en la zona, los que fueron modificados para que sean compatibles con el espectro de diseño del código IBC-09 para roca (suelo B). Toda la información se incorporó y presentó en el programa de sistema de información geográfica ArcGIS®. Los lectores interesados en obtener mayor información sobre este estudio y el método propuesto pueden referirse a Villarreal (2015).

AGRADECIMIENTOS

Se agradecen las recomendaciones del Dr. Carlos Huerta, sismólogo del Programa de Movimiento Fuerte de UPR-M, al Dr. José Martínez-Cruzado, director del Programa de Movimiento Fuerte de UPR-M y a los Dres. Ricardo López y Ricardo Ramos, profesores de Ingeniería Estructural y Geotécnica de UPR-M.

REFERENCIAS

- ASCE/SEI 7-10 (2010). *Minimum Design Loads for Building and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- Bardet, J., Ichil, K. y Lin, C. (2000). "EERA: A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits", Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, California.
- Cauzzi, C., Fäh, D., Pessina, V., Faccioli, E. y Smerzini, C. (2012). "Topographic amplification from recorded earthquake data and numerical simulations", *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, Paper No. 2341.
- ESRI (2014). "ArcGIS Geographic Information System", Environmental Systems Research Institute, recuperado de: www.esri.com.
- IBC-09 (2009). "International Building Code 2009", International Code Council, Washington, DC.
- UBC-97 (1997). "Uniform Building Code 1997", International Conference of Building Officials, Whittier, California.
- Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

- Llavona, A.C. (2004). "Mapas de tipos de suelos (según el UBC 97) y potencial de licuación para el municipio de Mayagüez, Puerto Rico", Tesis de Maestría en Ciencias, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, Puerto Rico.
- Lugo, C.Y. (2007). "Development of a geotechnical database for the city of Mayagüez, Puerto Rico", Tesis de Maestría en Ciencias, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez.
- Macari, E.J. (1994). "A Field Study in Support of the Assessment for Liquefaction and Soil Amplification in Western Puerto Rico", Final Report, Puerto Rico Earthquake Safety Commission.
- Martínez, J.A., Irizarry, J. y Portela, G. (2001). "Espectros de diseño para las ciudades principales de Puerto Rico basado en registros de aceleraciones mundiales", *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 1, No. 1, pp. 21-31.
- Montejo, L. y Suárez, L. (2013). "An improved CWT based algorithm for the generation of spectrum compatible records", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, Springer Open Journal, pp. 5-26.
- Odum, J., Williams, R., Stephenson, W., Worley, D., Hillebrandt-Andrade, C., Asencio, E., Irizarry, H. y Cameron, A. (2007). "Near-Surface Shear Wave Velocity Versus Depth Profiles, Vs30, and NEHRP Classifications for 27 Sites in Puerto Rico", Open-File Report 2007-1174, The United States Geological Survey, Reston, Virginia.
- Pacheco, J.F. y Sykes, L.R. (1992). "Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 82, No. 3, pp. 1306-1349.
- Pando, M.A., Suárez, L.E., Martínez, J.A., Lugo, C.Y., Llavona, A. y Pérez, E. (2006). "Ground Motion Evaluation and Geotechnical Database for the City of Mayagüez, Puerto Rico", NEHRP Report 04HQGR0075, United States Geological Survey, Reston, Virginia.
- Ritta, R.J. (2009). "Periodos fundamentales de sitio utilizando microtemblores: comparación con otros métodos y aplicación a Mayagüez, Puerto Rico", Tesis de Maestría en Ciencias, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, Puerto Rico.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J. y Seed, H.B. (1972). "SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites", Report UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Seed, H. y Idriss, I. (1970). "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis", Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, California.
- Seed, H., Wong, R., Idriss, I. y Tokimatsu, K. (1986). "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 112, No. GT1, pp. 1016-1032.
- Suárez, L. y Montejo, L. (2007). "Applications of the wavelet transform in the analysis and generation of artificial accelerograms", *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 27, No. 2, pp. 173-197.
- Sun, J., Golesorkhi, R. y Seed, H. (1988). "Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cohesive Soils", Report No. UCB/EERC-88/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, California.
- Villarreal, A.F. (2015). "Proyecto piloto para la microzonificación sísmica en Puerto Rico: el caso de Mayagüez", Tesis de Maestría en Ciencias, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez.

