

# Generación del ambiente sísmico para la zona centro de la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México

Miguel Ángel DÍAZ<sup>a,1</sup>, Luis OSORIO<sup>a</sup>, Eduardo BOTERO<sup>a</sup> y Efraín OVANDO<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México

**Resumen.** En la ciudad de Guadalajara, la ausencia de una base de datos de registros de sismos fuertes dificulta la realización de análisis dinámicos para determinar los efectos de interacción suelo-estructura para obras de gran importancia, como viaductos, túneles, edificios históricos de gran interés, etc. En este artículo se presenta una propuesta del ambiente sísmico. Definida a partir de historias de tiempo sintéticas realistas generadas con base en registros medidos en la zona centro, y congruente con un espectro de peligro uniforme correspondiente a un escenario sísmico para un periodo de retorno de 500 años.

**Palabras Clave.** Respuesta de sitio, análisis dinámicos, sismos sintéticos, espectros de aceleración, deconvolución.

## 1. Introducción

El diseño sísmico de estructuras generalmente se realiza con base en espectros de diseño, estos son envolventes de espectros de respuesta de sitio de un número infinito de sismos probables que pueden presentarse en una zona determinada. Existen casos particulares como son los análisis de interacción dinámica suelo-estructura, el diseño de estructuras irregulares que requieren de un análisis no lineal, o los análisis de respuesta de sitio específicos que requieren la selección de una historia de aceleración que pueda representar las exigencias de un escenario de referencia.

En este contexto, en la práctica común se selecciona un sismo de una base de datos. Este sismo se elige con base en la compatibilidad de la aceleración espectral máxima del registro con respecto a un espectro de referencia de interés. La incompatibilidad de las características principales de los movimientos como son la duración y el contenido de frecuencias son las desventajas de esta metodología. Un método más actual es el propuesto por Lilhanand y Tseng (1988) [1] que tomaron como base, para sus trabajos, Abrahamson (1992) [2] y Hancock *et al.* (2006) [3]. Este método permite generar historias de aceleraciones sintéticas realistas a partir de registros medidos en el sitio de interés para hacerlos compatibles con un espectro de referencia especificado.

En este artículo se presentan los acelerogramas sintéticos generados para la zona centro de la ciudad de Guadalajara, Jalisco. Las señales se generaron a partir de registros medidos en de la red acelerográfica de la ciudad, los cuales se ajustaron a un espectro de

---

<sup>1</sup>Miguel Ángel Díaz Guzmán, Coordinación de Geotecnia, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México; E-mail: MDiazGu@iingen.unam.mx.

peligro uniforme para un periodo de retorno de 500 años propuesto por la Comisión Federal de Electricidad. Estas historias de tiempo sintéticas podrán ser empleados en análisis de interacción dinámica, análisis no lineales o para la determinación de espectros de respuesta de sitio de predios específicos en el centro de Guadalajara.

## 2. Metodología

Para generar las señales sintéticas se empleó la metodología propuesta por Lilhanand y Tseng (1988) [1], la cual permite ajustar una historia de aceleraciones registrado en el sitio de interés a un espectro de referencia que define la exigencia sísmica esperada. Esta metodología considera que el tiempo en el cual se presenta la respuesta espectral de una historia de aceleraciones no cambian cuando se hace un pequeño ajuste a ésta, por lo cual se pueden hacer pequeños ajustes en el dominio del tiempo sin modificar las características principales del acelerograma.

## 3. Selección de registros

Para garantizar que los sismos sintéticos generados sean consistentes con los posibles escenarios sísmicos de la zona, los sismos semilla deben ser tomados de registros de estaciones sismológicas que se encuentren en la zona de influencia de interés. De esta manera se asegura la compatibilidad en el contenido de frecuencias, duración y energía, definiéndose ambientes sísmicos cada vez más realistas.

Para cumplir con el objeto de estudio, se tomaron historias de aceleraciones registradas en la estación sismológica ubicada en la Rotonda de los Jaliscienses Ilustres, identificada como ROTO en la base mexicana de sismos fuertes (1996) [4]. Esta estación se localiza en el corazón del centro de la ciudad de Guadalajara en una gran plaza junto a la Catedral. Esta característica hace que los registros se pueden considerar como de campo libre.

### 3.1. Sismo semilla

Para la generación de las historias de tiempo sintéticas se tomó el registro del sismo de 1995 cuyo epicentro se ubicó en la zona de subducción frente a las costas de Manzanillo, Colima, de magnitud  $M_s=7.3$ , empleándose las componentes horizontales de este registro. La duración del sismo fue de 125 segundos con una aceleración máxima del terreno de 0.017 g en la componente Norte-Sur del movimiento. En las Figuras 1 y 2 se presentan las componentes horizontales de la historia de aceleraciones del sismo 1995.

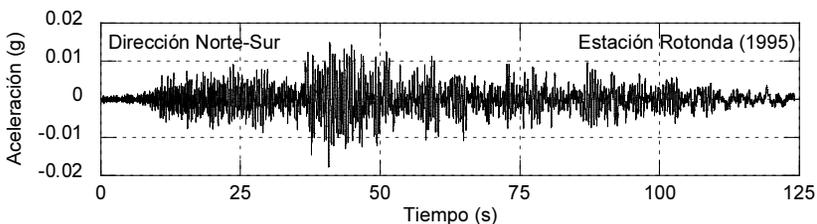
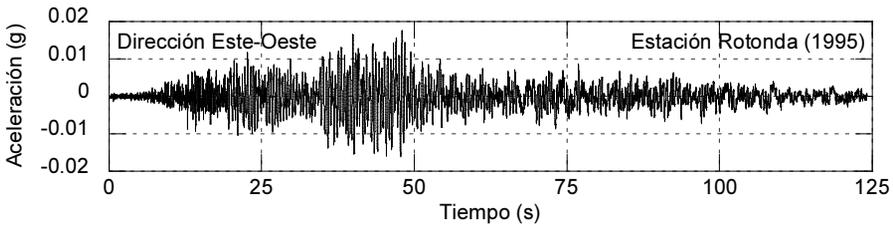
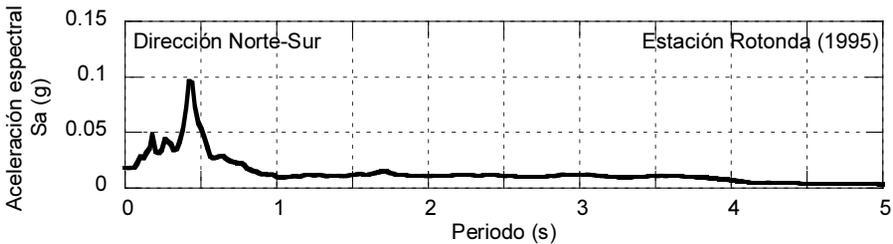


Figura 1. Registro de aceleración en la estación Rotonda del sismo de 1995 en la dirección Norte-Sur.

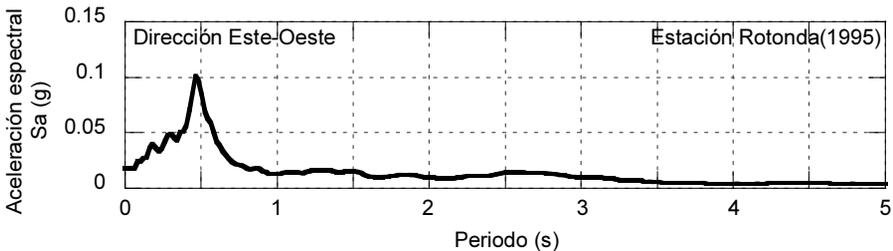


**Figura 2.** Registro de aceleración en la estación Rotonda del sismo de 1995 en la dirección Este-Oeste.

En las Figuras 3 y 4 se presentan los espectros de aceleración de las dos componentes del registro sísmico, en éstas se puede observar que en la componente Norte-Sur la ordenada espectral máxima es de 0.097 g para un periodo estructural de 0.48 segundos. Cabe hacer notar que los movimientos registrados en la estación Rotonda son a nivel de la superficie, por lo tanto, para llevarlos a la roca basal se tienen que deconvolver estos movimientos.



**Figura 3.** Espectro de aceleración absoluta del registro de la Rotonda de 1995 en la dirección Norte-Sur.



**Figura 4.** Espectro de aceleración absoluta del registro de la Rotonda de 1995 en la dirección Este-Oeste.

### 3.2. Deconvolución del registro

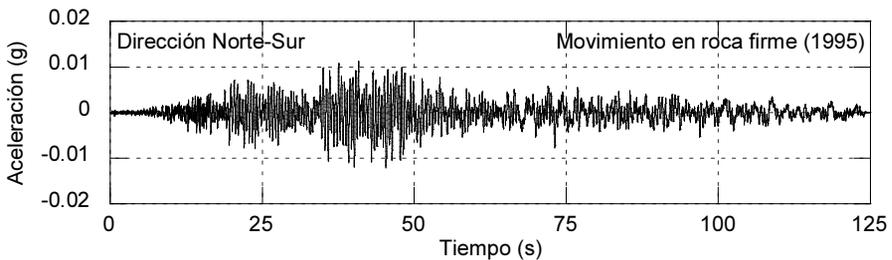
Para generar un sismo sintético con características de un afloramiento de roca, los movimientos registrados en la superficie de un depósito de suelo deberán ser transferidos a la roca basal que subyace el depósito mediante un proceso de deconvolución. Mediante este proceso se transfirió el movimiento registrado en superficie a la roca basáltica que se encuentra por debajo del depósito a una profundidad de 44 m. Las características de rigidez del depósito de suelo se determinaron a partir de la relación elástica que existe entre la velocidad de propagación de ondas de corte y el módulo de rigidez. La velocidad de onda de corte se obtuvo de una campaña de exploración de campo que realizó el Instituto de Ingeniería de la UNAM durante la construcción de una nueva línea del Tren

Eléctrico Urbano. El perfil estratigráfico usado en el proceso de deconvolución se muestra en la Tabla 1.

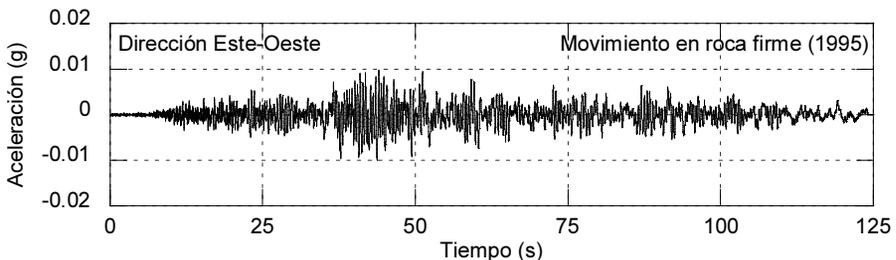
**Tabla 1.** Perfil estratigráfico y parámetros de rigidez para la estación Rotonda.

Estrato	Peso volumétrico	Espesor	Velocidad de onda de corte	Módulo de rigidez
	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$E$ m	$V_s$ m/s	$G$ kPa
Est-1	16.71	4	192	63000
Est-2	16.36	5	300	150000
Est-3	18.54	6	300	170000
Est-4	19.05	8	320	199000
Est-5	18.28	11	450	377000
Est-6	19.28	4	540	573000
Est-7	20.40	6	636	841000

El proceso de deconvolución se realizó por medio de un análisis de propagación de ondas de corte unidimensional con el código de SHAKE91 creado por Idriss y Sun (1992) [5]. En las Figuras 5 y 6 se presentan las historias de aceleraciones a la profundidad de la roca basal, para ambas componentes del registro.



**Figura 5.** Registro de aceleración a nivel de la roca firme para la estación Rotonda del sismo de 1995 en la dirección Norte-Sur.

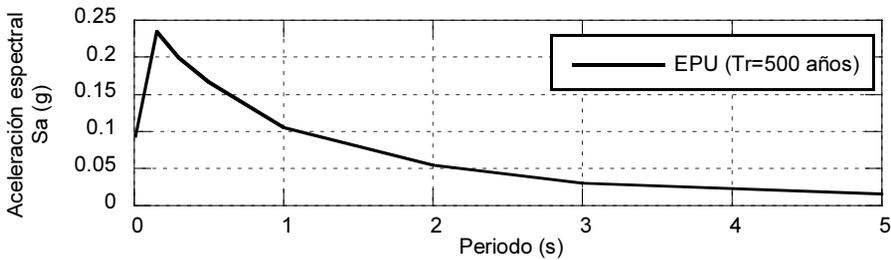


**Figura 6.** Registro de aceleración a nivel de la roca firme para la estación Rotonda del sismo de 1995 en la dirección Este-Oeste.

#### 4. Espectro de referencia

El espectro de referencia objetivo para este trabajo es el espectro de peligro uniforme (EPU) para un afloramiento de roca, propuesto para la ciudad de Guadalajara por la Comisión Federal de Electricidad, obtenido con el programa PRODISIS (2015) [6] para un periodo de retorno de 500 años. En la Figura 7 se muestra el espectro de referencia

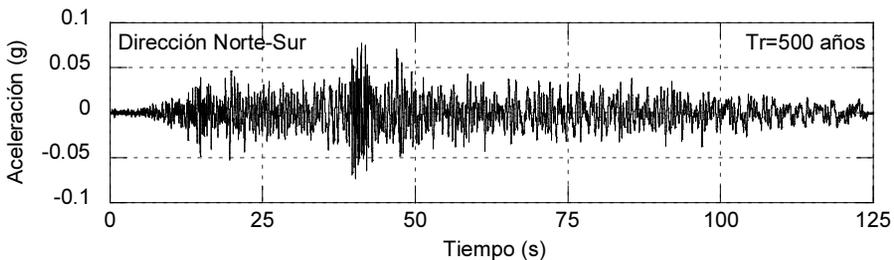
objetivo, este escenario sísmico contempla una aceleración de la roca de 0.093 g y una ordenada espectral máxima de 0.24 g para un periodo estructural de 0.15 segundos.



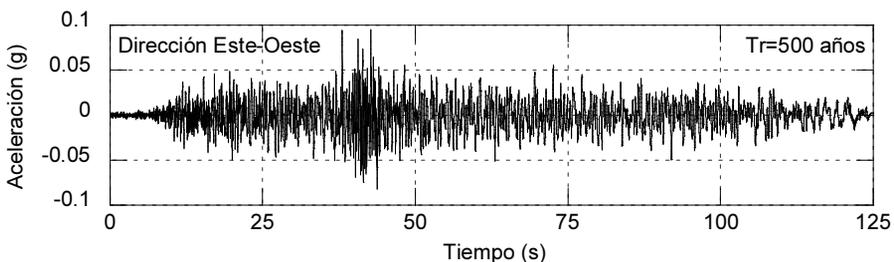
**Figura 7.** Espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 500 años para el centro de la ciudad de Guadalajara.

## 5. Sismos sintéticos

Los sismos semilla fueron ajustadas al espectro de peligro uniforme mediante la metodología explicada en el apartado 2 de este artículo. Las señales sintéticas se obtuvieron empleando el programa RSPMatch 99 (1992) [2]. Este programa implementa el algoritmo de Lilhanand y Tseng (1988) [1] para modificar una historia de aceleraciones en el dominio del tiempo y hacerla compatible con el espectro de referencia especificado. En total se obtuvieron 2 registros sintéticos, uno para cada una de las componentes del registro original del sismo de 1995. En las Figuras 8 a 9 se presentan las historias de aceleraciones sintéticas obtenidas para las componentes Norte-Sur y Este-Oeste, respectivamente.



**Figura 8.** Sismo sintético con periodo de retorno de 500 años para la componente Norte-Sur.



**Figura 9.** Sismo sintético con periodo de retorno de 500 años para la componente Este-Oeste.

En la Figura 10 se presentan comparaciones entre el espectro de aceleración de referencia y los espectros de los sismos sintéticos. Al observar éstas se pudo verificar que las señales se ajustan con una buena aproximación a los espectros de referencia.

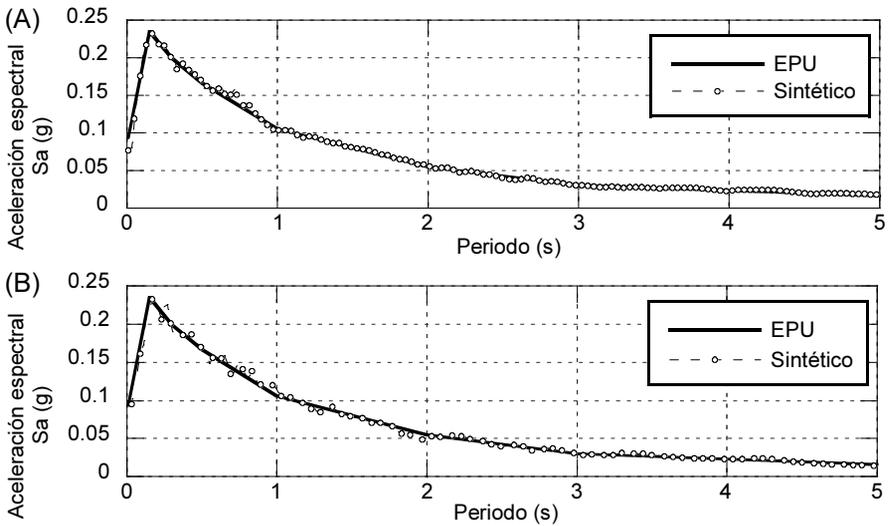


Figura 10. Ajuste de espectros sintéticos a EPU de referencia: A) componente norte-sur y B) componente este-oeste.

### 6. Análisis de respuesta de sitio

Las historias de tiempo generadas fueron empleadas en análisis lineales equivalentes llevados a cabo para determinar la respuesta del sitio de la Rotonda, los cuales son consistentes con el nivel de energía que podrían generar escenarios sísmicos con un periodo de retorno de 500 años, así como, los niveles de amplificación de su respuesta. Para caracterizar el comportamiento cíclico de la rigidez y amortiguamiento del suelo en los análisis, fueron empleadas las curvas de degradación de módulos de rigidez y amortiguamiento para arenas propuestas por Seed & Idriss en 1970 [7], estas curvas se presentan en la Figura 11 y 12, respectivamente.

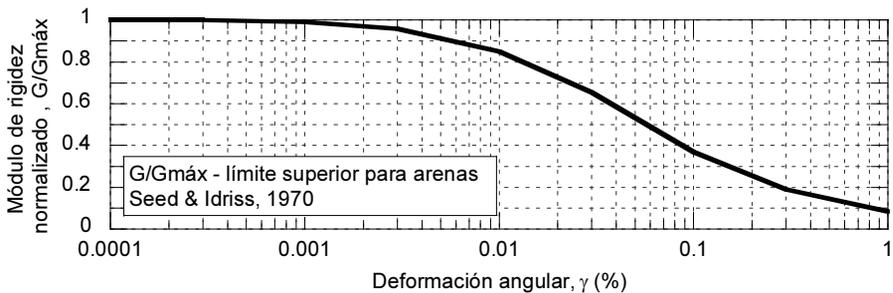


Figura 11. Curva de degradación de módulo de rigidez para arenas (Seed & Idriss, 1970) [7].

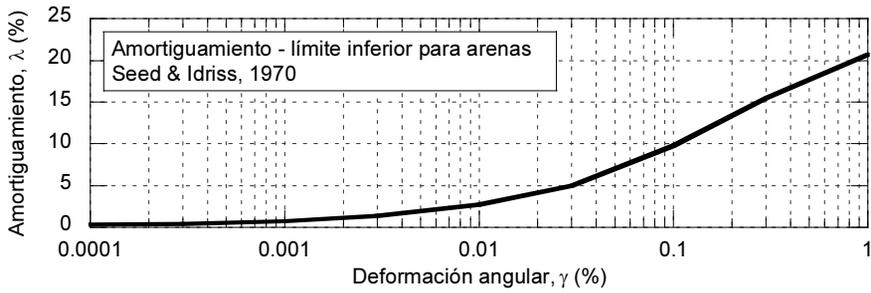


Figura 12. Curva de aumento de amortiguamiento para arenas (Seed & Idriss, 1970) [7].

Para la ejecución de los análisis de respuesta de sitio se empleó la secuencia estratigráfica que se presenta en la Tabla 1, misma que se utilizó en el proceso de deconvolución. En la Figura 13 se presentan las gráficas de los espectros de respuesta de aceleraciones absolutas de este depósito suelo, tomando como movimiento de entrada los acelerogramas sintéticos colocados en la base del depósito.

En las respuestas espectrales se observó que la aceleración máxima del terreno es de 0.235 g para la componente Norte-Sur y de 0.265 g para la componente Este-Oeste. Ambos análisis presentaron su máxima aceleración espectral para un periodo estructural de 0.44 segundos, la ordenada espectral máxima para la componente Norte-Sur es de 1.05 g y para la componente Este-Oeste es de 1.01 g.

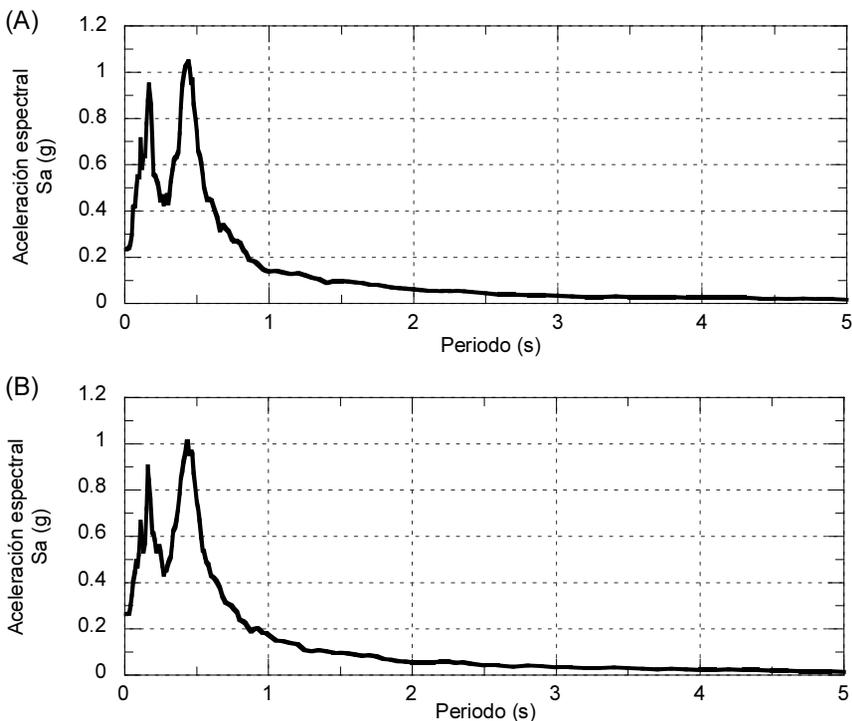


Figura 13. Espectros de aceleración absoluta en los análisis de respuesta de sitio empleando los sismos sintéticos: A) componente Norte-Sur y B) componente Este-Oeste.

## 7. Conclusiones

Mediante la implementación de la metodología propuesta por Lilhanand y Tseng (1988) se generaron un par de historias de aceleraciones sintéticas para la zona centro de la ciudad de Guadalajara, Jalisco.

Estas señales se generaron a partir de registros medidos en el sitio de interés durante el sismo de 1995. Los movimientos registrados en la estación sismológica ROTO fueron modificados en el dominio del tiempo para hacerlos consistentes con un espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 500 años, obtenido con el programa PRODISIS.

Las historias de tiempo sintéticas representan escenario compatibles con las características de los movimientos sismos que pudieran presentarse en el sitio de interés, observándose congruencia en el tiempo y contenido de frecuencias con la señal de origen.

En este contexto, estos registros podrán ser empleados como movimientos de entrada en análisis de respuesta de sitio, análisis no-lineales, o en modelos de interacción dinámica suelo-estructura para obras de gran importancia, como viaductos, túneles, edificios históricos de gran interés, etc. Cumpliendo los requisitos de la norma vigente en cuanto al periodo de retorno mínimo a considerar para la ciudad de Guadalajara.

Finalmente, los registros se emplearon para la realización de análisis de respuesta de sitio tomando en cuenta las características de rigidez del depósito de suelo que subyace a la estación acelerográfica de la Rotonda de los Jaliscienses Ilustres en el centro de Guadalajara, donde se observaron los niveles de amplificación que pudieran presentarse para un escenario sísmico correspondiente a un periodo de retorno de 500 años.

## Referencias

- [1] Lilhanand K., Tseng w. S., Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple-damping design spectra, Proceedings of ninth world conference on earthquake engineering Vol. 2 (1988), 819-824.
- [2] Abrahamsen, N.A., Non-stationary spectral matching, *Seismological Research Letters* 63 (1992)
- [3] Hancock J., Watson-Lamprey J., Abrahamson N. A., Bommer J. J., Markatis A., McCoy E., Mendis R., An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets, *Journal of earthquake engineering* Vol. 10 (2006), 67-89.
- [4] BMSF, Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes, *SMIS* (1996)
- [5] Idriss I. M., Sun J. I., A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits, Center for geotechnical modeling – University of California (1992).
- [6] Comisión Federal de Electricidad, PRODISIS V4.0, Manual de diseño por sismo, Diseño por sismo (2015).
- [7] Seed H. B., Idriss I. M., Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, Report No. EERC 70-10 (1970), Earthquake engineering resource center, University of California, Berkeley.