

## SEISMIC HAZARD ANALYSIS AND SITE EFFECTS FOR GUADALAJARA METROPOLITAN AREA

A. Monserrat Buenrostro <sup>(1)</sup>, Alonso Gómez Bernal <sup>(2)</sup>, Hugón Juárez García <sup>(2)</sup>

Profesora, Departamento de Ingeniería Civil y Topografía, Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Blvd. Marcelino García Barragán #1421, 44430 Guadalajara, México. [angelica.buenrostro@academicos.udg.mx](mailto:angelica.buenrostro@academicos.udg.mx)

Profesor Investigador, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Edificio P4, 3er Piso, Av. San Pablo # 180, 02200 Ciudad de México, México. [agb@correo.azc.uam.mx](mailto:agb@correo.azc.uam.mx) [hjg@correo.azc.uam.mx](mailto:hjg@correo.azc.uam.mx)

### ABSTRACT

A seismic hazard analysis was developed for Guadalajara Metropolitan Area (ZMG), with a probabilistic approach, using the methodology developed by McGuire (2004). The ZMG is located on the central part of Jalisco State, in the Pacific Coast of Mexico. ZMG is comprised of six cities: Guadalajara, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Tlajomulco de Zúñiga and El Salto. The seismic hazard settings were defined, using Uniform Hazard Spectra (UHS) and seismic parameters. Three Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) were identified and a disaggregation study is presented. Geotechnical information was characterized for some ZMG sites; and hence site effects estimations were also investigated. UHS were established for both firm and soft soils for ZMG. Finally, the computed seismic parameters were compared to those for the seismic design guidelines for Guadalajara and Zapopan cities, and we found out that our UHS captured better the seismic settings of these cities of the Mexican Pacific Coast.

**Keywords:** Seismic hazard, Uniform Hazard Spectra, site effects, seismic sources, GMPEs, recurrence relations, deaggregation, transfer function.

## ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO Y EFECTOS DE SITIO PARA LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA

### RESUMEN

En este trabajo se desarrolló un análisis de peligro sísmico para la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), con un enfoque probabilista, mediante la metodología desarrollada por McGuire (2004). La ZMG es localizada en la parte central del Estado de Jalisco en la Costa del Pacífico de México. La ZMG está conformada por seis municipios, Guadalajara, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Tlajomulco de Zúñiga y El Salto. El peligro sísmico en la metodología probabilista se define con Espectros de Peligro Uniforme (EPU) y considera todas las fuentes sísmicas que afectan a la zona de estudio, se identificaron tres ecuaciones de movimiento y se presenta un estudio de desagregación. Se incluyen efectos de sitio a partir de

algunos estudios geofísicos de sitios ubicados en la ZMG. Se determinaron EPU para terreno firme y para terreno blando de la ZMG. Los parámetros sísmicos de este trabajo, se compararon con la normatividad de diseño por sismo vigente de los municipios de Guadalajara y Zapopan, y encontramos mejores estimaciones sísmicas que las desarrolladas en estas normativas.

**Palabras clave:** Peligro sísmico, Espectros de Peligro Uniforme, efectos de sitio, fuentes sísmicas, relaciones de atenuación, relaciones de recurrencia, desagregación, función de transferencia.

## 1 INTRODUCCIÓN

El peligro sísmico es una medida de la frecuencia de la ocurrencia de sismos con cierta intensidad; se cuantifica con la frecuencia con que excede un cierto nivel de aceleración o desplazamiento espectral y depende de la tectónica del territorio y de la sismicidad de las fuentes que intervienen en una región (Pérez *et al.*, 2005). Un análisis de peligro sísmico envuelve una estimación cuantitativa de sismos ocurridos en un sitio en particular. Se obtiene mediante enfoques deterministas y probabilistas. Para este estudio se utilizó un enfoque probabilista con la metodología de Cornell (1968), desarrollada por McGuire (2004), la cual provee un marco de referencia donde las incertidumbres pueden ser identificadas, cuantificadas y combinadas.

La metodología de Cornell (1968) utiliza dos modelos para la determinación del criterio del sismo de diseño a partir de un análisis probabilista:

1. Un modelo de sismicidad, que describe la distribución geográfica de las fuentes de un evento y una distribución de magnitudes; que se expresa mediante relaciones de atenuación del movimiento fuerte del suelo.
2. Un modelo de atenuación o GMPE que describe los efectos sobre un sitio dado mediante funciones que dependen de la magnitud, distancia de fuente a sitio, tipo de suelo, entre otras variables (Inca, 2013).

La ecuación que se utiliza para evaluar el peligro sísmico de acuerdo a la metodología de Cornell (1968) es:

$$\lambda(y>Y) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(y>Y) = \sum_{i=1}^N u_i \iiint P_i[y>Y | m, r, \epsilon] f_{Mi}(m) f_{Ri}(r) f_{\epsilon i}(\epsilon) dm dr d\epsilon \quad (1)$$

Donde  $\lambda(y > Y)$  es la tasa anual de excedencia del nivel del movimiento  $Y$ , debido a la ocurrencia de sismos en las  $N$  fuentes sísmicas que es igual a la suma de las tasas anuales de excedencia en cada zona fuente  $\lambda_i(y > Y)$  las mismas que presentan una tasa anual de sismos  $u_i$ ; el término  $P_i[y > Y | m, r, \epsilon]$  da la probabilidad de excedencia condicionada al trio de variables  $m, r, \epsilon$  que representan la magnitud, distancia y epsilon;  $f_{Mi}(m)f_{Ri}(r) f_{\epsilon i}(\epsilon)$  son las funciones de densidad de probabilidad de la magnitud, distancia y epsilon (Aguir y Rivas, 2018).

## 2 POTENCIAL SÍSMICO PARA LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA

En la evaluación del peligro sísmico es importante definir, los factores que influyen en la sismicidad de la región seleccionada, como aspectos geológicos y geotécnicos, y sobre todo se debe de estudiar el potencial sísmico de las posibles fuentes que afecten a la zona de estudio.

Los grandes temblores a lo largo de la costa del pacífico en el Estado de Jalisco, son causados por la subducción de las placas oceánicas de Cocos y de Rivera, bajo la placa de Norteamérica y por ello son conocidos como sismos de subducción (ver figura 1). La placa de Rivera, se desplaza bajo la placa Norteamericana en el estado de Jalisco con una velocidad relativa de 2.5 cm/año frente a la costa de Manzanillo. La frontera entre las placas de Rivera y de Norteamérica se estima que interseca la costa de México cerca de Manzanillo (Ordaz, 2007).



**Figura 1.** Placas Tectónicas que interactúan en el Territorio Mexicano (SSN, 2016)

En los últimos 160 años han ocurrido sismos muy importantes en el Bloque de Jalisco (ver figura 2), que han afectado a los estados de Jalisco, Colima y Michoacán con magnitudes representativas desde 5.1 hasta 8.2, desde el año 1567 hasta el 2003, como el sismo del 3 de Junio de 1932, en la costa de Jalisco, donde se registró el sismo de mayor magnitud del siglo XX, que ha ocurrido en México, con una magnitud de 8.2 y réplicas de 7.8 y 6.9 los días 18 y 22 de junio de 1932, respectivamente (Nuñez-Cornú *et al.*, 2004).

Las principales estructuras tectónicas continentales más relevantes y de mayor impacto que se observan en el Bloque de Jalisco son:

- **Graben de Tepic-Zacoalco.** Estructura con una orientación NW, con un corredor aproximado de 50 km por 250 km, es uno de los brazos del sistema triple de rift en el oeste de México. Junto con el rift de Colima y la Faja Volcánica Transmexicana, que limita el bloque de Jalisco (Martínez, 2011). El graben de Tepic-Zacoalco, generó sismos del 27 de diciembre de 1568 con  $M = 7.5?$ , y el del 11 de febrero de 1875 con  $M = 7.5$ , pero una intensidad bastante grande de VIII (Lazcano, 2001).
- **Graben de Chapala.** Esta estructura contiene el lago natural de Chapala a 1500 m de altitud, de 115 km de largo y de 10 a 25 km de ancho. El graben de Chapala se desarrolló en una falla transcurrente lateral izquierda dentro de la zona regional de falla Chapala-Tula E-W (Martínez, 2011). A éste graben se le asocia el sismo del 2 de octubre de 1847 con  $M = 7.1$  (Lazcano, 2001).
- **Graben de Colima.** Estructura con anchura variable entre 20 y 60 km. El graben de Colima se divide en dos sectores, el graben norte, y el central. El graben está definido por fallas normales paralelas a su dirección, intersecta dos rifts: el de Zacoalco, al noreste, y al noroeste el rift de Citlala, para formar una unión triple, a unos 50 km al sur-suroeste de Guadalajara (Martínez, 2011). Es el graben con mayor actividad de los tres, entre los sismos más destacados por su magnitud y daños se destacan, los sismos de 1612 y 1785 con magnitudes menores a 6.0 y el del 22 de enero del 2003 con  $M_w = 7.4$  (Lazcano, 2001).

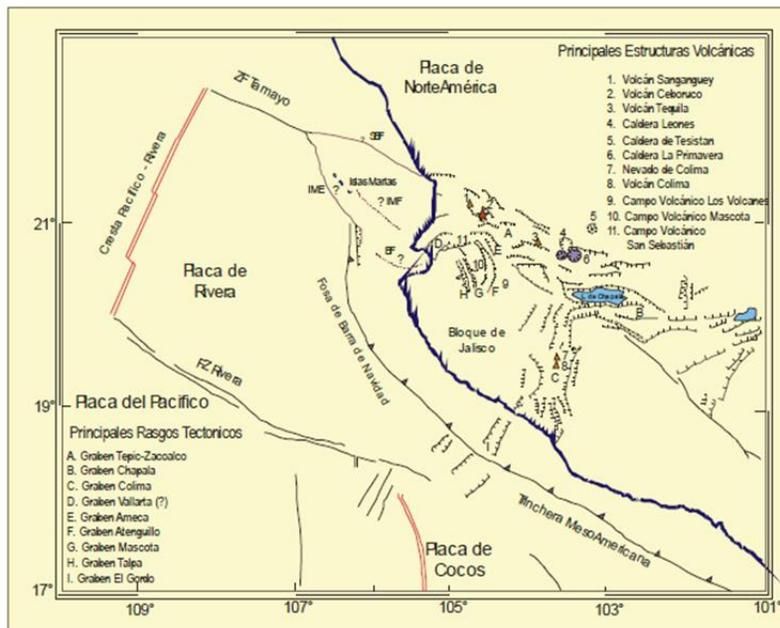
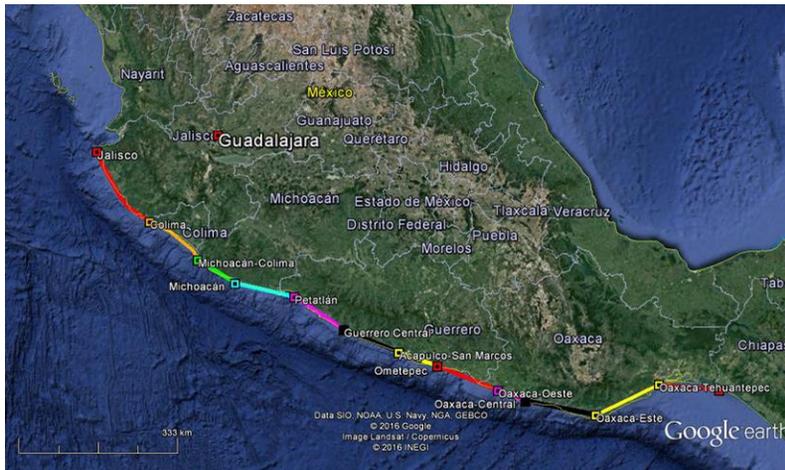


Figura 2. Bloque de Jalisco (Núñez-Cornú, 2011)

## 2.1 Fuentes sísmicas tipo interplaca en la zona de subducción de México utilizadas

Nishenko y Singh (1987) estudiaron los intervalos de recurrencia de sismos interplaca a lo largo de la zona de subducción de México (ver figura 3), de los trece segmentos o gaps característicos del país, seis se utilizaron en este estudio ya que se analizaron las fuentes interplaca que se encuentran dentro de un radio de influencia de 500 km, éste caso de estudio es explicado de manera detallada en el apartado 3.1. Los seis gaps utilizados se describen brevemente:

1. **Michoacán.** Este segmento se encuentra en una longitud de 101.5°W a 103°W. Coincide con la intersección batimétrica de la zona de fractura de Orozco con la parte media de la trinchera americana. La ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 1985,  $M_s = 8.1$ , indica que este gap tiene un modelo de grandes movimientos poco frecuentes. Se identificó un evento previo, el 7 de junio de 1911 con  $M_s = 7.9$ . El tiempo de recurrencia estimado para sismos tan grandes en esta región es de aproximadamente 75 años.
2. **Colima I.** Este segmento se encuentra en la longitud de 103°W a 103.7°W. Sismos previos asociados a este segmento son los del 15 de abril de 1941 con  $M_s = 7.9$  y el del 30 de enero de 1973 con  $M_s = 7.5$ .
3. **Colima II.** Este segmento se encuentra entre las longitudes de 103.7°W a 104.5°W. El gap de Colima es definido a base de las réplicas del sismo de Jalisco del 3 de junio de 1932 (Singh *et al.*, 1985) y cubre una zona de aproximadamente 60 km de longitud entre la zona del sismo de 1932 y el de 1973.
4. **Jalisco.** Entre las longitudes 104.3°W a 105.7°W. Los grandes sismos previos ocurridos en el estado de Jalisco fueron: el del 25 de marzo de 1806 con  $M_s = 7.5$ ; el del 31 de mayo de 1818 con  $M_s = 7.7$ ; el del 20 de enero y 16 de mayo de 1900 con  $M_s = 7.6$  y 7.1 respectivamente y los del 3 y 18 de junio de 1932 con  $M_s = 8.1$  y 7.8. El evento del 3 de junio de 1932 es uno de los eventos más grandes ocurridos en México hasta la fecha. Este sismo fue causado por una ruptura de la Placa de Rivera.
5. **Guerrero Central.** Se encuentra entre las longitudes 100°W a 101°W. Esta zona tiene la mayor tasa de recurrencia a lo largo de la zona de subducción. Sismos previos ocurridos en este segmento de  $M_s \geq 7.5$  fueron el del 7 de abril 1845?,  $M_s = 7.9$ ; 24 de diciembre de 1899,  $M_s = 7.7$ ; 26 de marzo de 1908,  $M_s = 7.8$ ; 30 de julio de 1909,  $M_s = 7.5$  y el del 16 de diciembre de 1911,  $M_s = 7.8$ .
6. **Petatlán.** Este segmento se encuentra entre las longitudes 101°W a 101.8°W. Sismos ocurridos en esta región con  $M_s \geq 7.5$  se incluyen los del 22 de febrero de 1943, con  $M_s = 7.7$ ; 14 de marzo de 1979,  $M_s = 7.9$ . En este segmento existe una gran variedad en los modos de ruptura.



**Figura 3.** Localización de los segmentos de ruptura de subducción tipo interplaca de la costa de México (Nishenko y Singh, 1987)

Nishenko y Singh (1987), usaron los resultados de Nishenko y Buland (1987), quienes examinaron los intervalos de recurrencia para temblores característicos usando una función normalizada,  $T/T_{ave}$ .  $T_{ave}$  es el promedio del intervalo de recurrencia observado para un segmento de falla específico, y  $T$  es un intervalo de recurrencia individual. Basado en un conjunto de datos globales. Nishenko y Buland (1987) encontraron que la distribución logarítmica normal, proporciona un ajuste adecuado a la recurrencia de datos de tiempo para los segmentos de subducción, a diferencia de la distribución de Gauss o Weibull (Rikitake, 1976; Lindh, 1983; Sykes y Nishenko, 1984; y Nishenko, 1985).

La función de densidad de probabilidad,  $f(T/\bar{T})$ , definida por Nishenko y Buland (1987) se define por la siguiente ecuación:

$$f(T/\bar{T}) = \frac{\bar{T}}{T\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln(T/\bar{T}) - \mu D)^2 / 2\sigma D^2} \quad (2)$$

donde:

$T$  = es un intervalo de recurrencia individual

$\sigma D$  = desviación estándar = 0.215

$\bar{T} = \ln(T_{ave}) + \mu D$

$T_{ave}$  = promedio del intervalo de recurrencia observado para un segmento de falla específico

$\mu D$  = media = -0.0099

El período de recurrencia esperado,  $T_{exp}$ , es un número basado en observaciones de  $T$  para un segmento de falla específico, éste es definido como:

$$T_{exp} = \bar{T} e^{\mu D + \sigma D^2 / 2} \quad (3)$$

Siguiendo la terminología sugerida por Wallace *et al.* (1984), la estimación del tiempo de recurrencia anterior también se puede presentar en términos de una ventana de tiempo de pronóstico o predicción. La ventana utilizada en este estudio se define como el intervalo de tiempo.

La ventana de tiempo usada en este estudio es definida por el intervalo de período:

$$[T_{\text{pred}}-\eta, T_{\text{pred}}+\eta] \quad (4)$$

donde:

$$T_{\text{pred}} = t_0 + T_{\text{exp}}$$

$T_{\text{pred}}$  = es el año del evento característico esperado obtenido del año del último sismo característico, más el período de recurrencia esperado

$t_0$  = es el año del último sismo característico

$\eta$  = 90% de intervalo de confianza para la estimación del  $T_{\text{exp}}$ , donde:

$$\eta = 1.645(\text{var}[T_{\text{exp}}])^{1/2}$$

$$\text{var}[T_{\text{exp}}] = (\bar{\sigma} / \bar{T}^2 + \sigma D^2) / T_{\text{exp}}^2$$

Los períodos de recurrencia aproximados por las ecuaciones (2), (3) y (4) aplicados a los segmentos de falla o fuentes de tipo interplaca se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Período de recurrencia lognormal obtenida por Nishenko y Singh (1987), para los segmentos de falla interplaca

| Segmento           | Longitud | Ancho | $t_0$ | $M_s$ | $T_{\text{pred}}$ | $\eta$ |
|--------------------|----------|-------|-------|-------|-------------------|--------|
|                    | km       | km    | año   |       | año               | años   |
| Guerrero Central   | 139      | 80    | 1899  | 7.7   | 1960              | 39     |
|                    |          |       | 1908  | 7.8   | 1976              | 44     |
|                    |          |       | 1909  | 7.5   | 1959              | 32     |
|                    |          |       | 1911  | 7.8   | 1979              | 44     |
| Petatlán           | 102      | 80    | 1979  | 7.6   | 2015              | 18     |
| Michoacán          | 133      | 80    | 1985  | 8.1   | 2015              | 37     |
| Colima             | 115      | 80    | 1973  | 7.5   | 2005              | 16     |
| Gap Colima-Jalisco | 180      | 80    | 1932  | 8.2   | 2054              | 61     |
|                    |          |       |       |       | 2010              | 51     |

## 2.2 Fuentes sísmicas tipo área o región utilizadas

El territorio de México se subdividió, de manera global, en unidades sismogenéticas con el propósito de estimar el riesgo, basándose en los datos de los catálogos de registros tomados por instrumentos de medición e históricos (crónicas y escritos). El territorio de México se subdividió en 19 regiones principales (Zúñiga *et al.*, 1997). Para nuestro estudio al igual que los segmentos interplaca, se analizaron las fuentes tipo área o región que se encuentran dentro de un radio de influencia de peligro sísmico de 500 km. Se tomaron en cuenta 11 fuentes tipo área o región, adicionales a los segmentos de falla explicados en el apartado 2.1 (ver figuras 4 y 5) de las cuales 10 son para sismos someros y 1 para sismos profundos. Las 11 regiones utilizadas se describen de forma breve:

1. **Región SUB1.** Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción (profundidad < 40 km). Zona de transición de la convergencia entre las placas Rivera y Norteamericana (NOAM) a la convergencia Cocos - NOAM.
2. **Región SUB2.** Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción. Convergencia Cocos - NOAM.
3. **Región RIV1.** Zona de eventos interplaca someros de fallamiento normal principalmente, interface Pacífico – Rivera.
4. **Región RIV2.** Zona de eventos interplaca someros de fallamiento de rumbo principalmente, interface Pacífico - Rivera.
5. **Región RIV3.** Zona de eventos interplaca de subducción somera. Interface Rivera - NOAM.
6. **Región BB.** Zona de eventos intraplaca (NOAM) someras, provincia de la Cuenca de Burgos (Burgos Basin).
7. **Región MVB.** Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros ( $h < 40\text{km}$ ).
8. **Región NAM.** Esta zona es de eventos intraplaca (NOAM) someros. Esta región comprende la actividad somera (profundidad menor a 40 km).
9. **Región BAR.** Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros, provincias de Cuencas y Sierras - Fisura del Río Bravo.
10. **Región BC1.** Esta zona comprende la actividad asociada a los eventos someros intraplaca en el área de Baja California.
11. **Región IN1.** Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia ( $40\text{ km} < h < 120\text{ km}$ ). Relacionados a la interface Cocos - NOAM.

Zúñiga *et al.* (1997), propone idealizar el proceso de ocurrencia de temblores como uno de poisson. En éste proceso los tiempos entre eventos se encuentran de forma exponencial y puede demostrarse que su distribución no se altera al aumentar el tiempo transcurrido sin un temblor.

En este proceso la densidad de probabilidades del tiempo entre eventos con magnitud mayor o igual a  $M$  es exponencial y está dada por:

$$P_t(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Donde  $t$  es el tiempo entre eventos con magnitud mayor que  $M$  y  $\lambda(M)$  es la tasa de excedencia de la magnitud  $M$ , definida como el valor esperado del número de temblores con magnitud mayor o igual  $M$ , por unidad de tiempo. Si se conoce  $\lambda(M)$ , la distribución de los tiempos entre eventos está totalmente determinada.  $\lambda(M)$  es una función que decrece con la magnitud, y se le ha asignado la siguiente forma funcional (Cornell y Vanmarcke, 1969):

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad (6)$$

donde:

$\lambda_0$ ,  $\beta$  y  $M_u$  = son parámetros que definen la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sísmicas

$M_0$  = es la magnitud por encima de la cual el catálogo esta completo, para todas se considera 4.5

Éste modelo teórico fue adoptado para los temblores costeros con  $M < 7$ , y para el resto de los temblores. Para los temblores superficiales, el proceso real de ocurrencia fue dividido artificialmente en dos, teniendo como límite la magnitud  $M = 7$ . Esto implica que, ésta es la magnitud máxima posible en la parte del proceso considerada poissoniana (Zúñiga et al., 1997). Los parámetros de recurrencia obtenidos para las regiones tectónicas tipo región o área usadas en este estudio se pueden observar en la tabla 2.

**Tabla 2.** Parámetros de períodos de recurrencia de las regiones o zonas tectónicas tipo área consideradas en el estudio (Zúñiga et al., 1997)

| Zona         | $E(\lambda_0)$ | $E(\beta)$ | $c(\beta)$ | $E(M_u)$ | $M_0$ |
|--------------|----------------|------------|------------|----------|-------|
|              | 1/año          |            |            |          |       |
| <b>SUB 1</b> | 0.041          | 2.42       | 0.282      | 7.2      | 4.5   |
| <b>SUB 2</b> | 3.484          | 2.210      | 0.089      | 7.2      | 4.5   |
| <b>RIV 1</b> | 0.595          | 2.390      | 0.195      | 7.2      | 4.5   |
| <b>RIV 2</b> | 4.512          | 2.390      | 0.079      | 7.2      | 4.5   |
| <b>RIV 3</b> | 0.191          | 2.660      | 0.248      | 7.2      | 4.5   |
| <b>BB</b>    | 0.080          | 2.410      | 0.286      | 5.4      | 4.5   |
| <b>MVB</b>   | 0.409          | 2.480      | 0.210      | 7.2      | 4.5   |
| <b>NAM</b>   | 1.756          | 3.160      | 0.076      | 7.4      | 4.5   |

| Zona | $E(\lambda_0)$ | $E(\beta)$ | $c(\beta)$ | $E(\mu)$ | $M_0$ |
|------|----------------|------------|------------|----------|-------|
|      | 1/año          |            |            |          |       |
| BAR  | 0.083          | 2.370      | 0.280      | 5.0      | 4.5   |
| BC 1 | 0.963          | 2.490      | 0.199      | 6.0      | 4.5   |
| IN 1 | 6.924          | 2.410      | 0.061      | 7.9      | 4.5   |

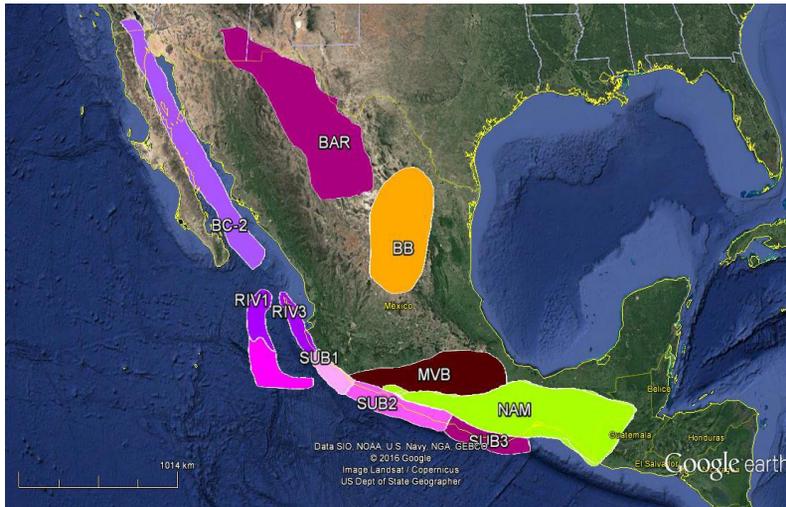


Figura 4. Fuentes tipo área para sismos someros interplaca e intraplaca usados para los casos estudiados (Zúñiga et al., 1997)

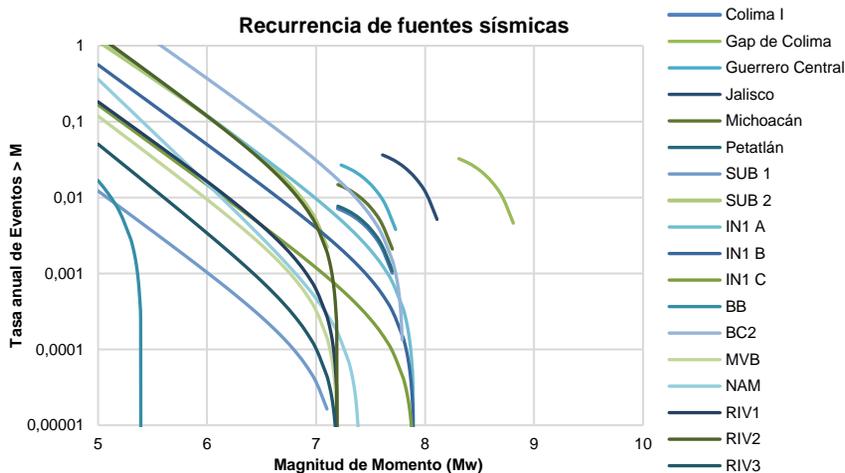


Figura 5. Regiones sismotectónicas de subducción tipo intraplaca para sismos profundos (Zúñiga et al., 1997)

### 2.3 Modelos de recurrencia

Las relaciones de recurrencia para las fuentes sísmicas utilizadas, fueron las propuestas por Nishenko y Singh (1987) para fuentes tipo interplaca. Y las de Zúñiga *et al.* (1997) para eventos de tipo área o región, desarrolladas en los apartados 2.1 y 2.2 del presente capítulo. Ambas propuestas se incluyen actualizadas en el programa de cómputo empleado para el análisis de peligro sísmico, EZ-FRISKv7.65™, el cual arroja estas relaciones como un modelo Gutenberg – Richter Truncado.

En la figura 6, se muestra la relación de la recurrencia anual de las fuentes sísmicas usadas, con la magnitud de momento ( $M_w$ ) que pueden tener los eventos causados por estas fallas, la figura nos indica un arreglo del modelo magnitud-recurrencia, Gutenberg-Richter Truncado.



**Figura 6.** Relación de Recurrencia de las fuentes sísmicas utilizadas para un  $r=500$  km con un modelo Gutenberg-Richter Truncado (Buenrostro, 2017)

### 2.4 Modelos de atenuación ( $GMPE_s$ )

Una vez determinada la tasa de actividad de cada una de las fuentes sísmicas, es necesario evaluar los efectos que, en términos de intensidad sísmica, produce cada una de ellas en un sitio de interés. Para ello se requiere saber que intensidad se presentaría en el sitio, si en la  $i$ -ésima fuente ocurriera un temblor con magnitud dada. A las ecuaciones que relacionan magnitud, posición relativa de la fuente-sitio e intensidad, se les conoce como leyes de atenuación (Ordaz *et al.*, 2007). Para este estudio se seleccionaron 3 leyes de atenuación de acuerdo a las fuentes caracterizadas para nuestro análisis de peligro sísmico, se involucraron modelos en los cuales se utilizaron catálogos de sismos de México, que representaran principalmente una respuesta espectral adecuada de los sismos de costa o subducción. Ya que el análisis de peligro sísmico no se está realizando para una edificación en particular, los modelos proporcionan suficiente información para encontrar espectros de respuesta elástica para un rango de período de interés

(Aguiar y Rivas, 2018). Los tres modelos utilizados son Youngs *et al.* (1997), García *et al.* (2005) y Arroyo *et al.* (2010).

#### 2.4.1 Youngs *et al.* (1997)

Este modelo fue desarrollado por RR. Youngs, S.J. Chiou, W.J.Silva y J.R. Humphrey. Se presenta una relación de atenuación para sismos de subducción, y sismos provocados por fallas de interplaca e intraplaca, con magnitudes de momento mayores a 5.0 y distancias de 10 a 500 km. Esta ley es empleada en el análisis ya que usa una base de datos de registros internacionales y dentro de ella se encuentran 23 registros de sismos fuertes en la zona de subducción de México. Las relaciones de atenuación fueron desarrolladas para aceleraciones pico (PGA) de zonas de subducción que son evaluadas mediante análisis de regresiones aleatorias de datos empíricos. Las constantes son determinadas por un análisis que incluye coeficientes de las relaciones de atenuación seleccionados para grupos de referencia y parámetros que representan perturbaciones de otros 5 grupos de referencias, C1 a C5 (Youngs *et al.*, 1997). El modelo está limitado a analizar hasta 4 segundos la respuesta espectral elástica, por lo cual, para edificaciones de períodos altos no es conveniente utilizarla, sin embargo, como se explicó en el párrafo anterior, éste modelo se adopta para éste estudio, ya que no se analiza el peligro sísmico de un edificio en específico sino se realiza un estudio general para la ciudad.

La ecuación que define esta ley para roca está dada por:

$$\ln SA(T) = 0.2418 + 1.414 M + C_1(T) + C_2(T) * (10 - M)^3 + C_3(T) * \ln(r_{rup} + 1.7818 e^{0.554 M}) + 0.00607 H + 0.3836 ZT \quad (7)$$

$$\text{Desviación estándar} = C_4 + C_5 M \quad (8)$$

donde:

SA (T) = aceleración espectral normalizada en g, calculada para el período T en estudio

T = período en segundos

C<sub>1</sub>(T), C<sub>2</sub>(T), C<sub>3</sub>(T), C<sub>4</sub>(T), C<sub>5</sub>(T) = dependientes del período T, obtenidos por medio de regresión de datos dados por Youngs *et al.* (1997)

M = magnitud de momento

H = profundidad al foco en km

ZT = tipo de falla; usar 0 para falla interplaca y 1 para falla intraplaca

r<sub>rup</sub> = distancia más cercana a la ruptura en km o distancia hipocentral. El intervalo de distancias es de 10 a 500 km

#### 2.4.2 García *et al.* (2005)

Por D. García, S.K. Singh, M. Herraíz, M. Ordaz y J.F. Pacheco. Este modelo fue desarrollado para sismos inslab o intraplaca de las costas de México (falla normal, profundidad intermedia), para sitios sobre roca firme, el número de eventos sísmicos que se utilizaron fueron 16 a distancias locales y regionales de

hasta 400 km, con momentos de magnitud ( $M_w$ ) entre 5.2 y 7.4 y profundidades focales ( $H$ ) entre 35 y 138 km (García *et al.*, 2005).

La ecuación que define esta ley para roca se define como:

$$\log SA(T) = C_1(T) + C_2(T) M_w + C_3(T) R - C_4(T) \log(R) + C_5(T) H + \sigma \quad (9)$$

donde:

$SA(T)$  = aceleración espectral horizontal para 5% de amortiguamiento en  $cm/s^2$

$T$  = período en segundos

$M_w$  = magnitud de momento

$H$  = profundidad al foco en kilómetros

$C_1(T) + C_2(T) + C_3(T) + C_4(T) + C_5(T)$  = constantes definidas por un análisis de regresión al conjunto de datos dependientes de cada período en García *et al.* (2005).

$R$  = es la distancia promedio de la distancia a la superficie de falla en km, definida por  $R = (R_2c/d + \Delta^2)^{1/2}$ , donde  $R_2c/d$ , es la distancia más cercana a la superficie de falla para eventos con  $M_w > 6.5$ , o la distancia hipocentral para el resto y  $\Delta = 0.0075 \times 100.507 M_w$ , el cual es un término de saturación de la fuente definido por Atkinson y Boore (2003)

$\sigma$  = desviación estándar

### 2.4.3 Arroyo *et al.* (2010)

Este modelo se desarrolló por D. Arroyo, D. García, M. Ordaz, M. A. Mora y S. K. Singh. Se derivaron relaciones de atenuación para componentes horizontales de pseudoaceleraciones de espectros de respuesta para sismos interplaca en México en roca (Clase B en la clasificación NEHRP) en la región de la costa. El modelo resultante tiene una precisión similar a los modelos derivados de bases de datos regionales y mundiales de zonas de subducción. Los resultados de este modelo revelan que la relación de atenuación en México tiende a ser más fuerte que las relaciones de atenuación mundiales para grandes eventos; y predicen éstas relaciones para grandes sismos a grandes distancias de la fuente a diferencia de cómo se podrían considerar para modelos globales.

Para un modelo circular de fuente finita en zonas de subducción la ecuación se define como:

$$\ln SA(T) = \alpha_1(T) + \alpha_2(T) M_w + \alpha_3(T) \ln \left[ \frac{E_1(\alpha_4(T) R) - E_1(\alpha_4(T) \sqrt{R^2 + r_0^2})}{r_0^2} \right] \quad (10)$$

donde:

$SA(T)$  = aceleración espectral horizontal para 5% de amortiguamiento calculada para  $T$

$\alpha_i(T)$  = son coeficientes determinados a través de un análisis de regresión

$R$  = distancia más cercana a la superficie de falla en km

$r_0$  = radio equivalente a una falla circular y se define como:  $r_0^2 = 1.4447 \times 10^{-5} + 2.3026 M_w$

$M_w$  = magnitud de momento

$E_1$  = integral exponencial, obtenida mediante métodos numéricos dada por:

$$E_1 = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt$$

### 3 ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

#### 3.1 Caso de estudio para diferentes radios de influencia

Se realizó un análisis para determinar el radio de influencia de peligro adecuado para la zona de estudio. Se obtuvieron Espectros de Peligro Uniforme (EPU), calculados para períodos de retorno de 20 años, 45 años, 100 años, 475 años, 975 años y 2475 años, que representan probabilidades de excedencia respectivamente, del 91.8%, 67.1%, 39.3%, 10%, 5%, 2%, de ocurrir en 50 años (vida útil de una edificación). Se localizaron los centros históricos de cada uno de los 6 municipios de la ZMG, (ver figura 7 (a)) y se trazaron radios de influencia de 200 km, 300 km y 500 km para cada uno de estos puntos de localización. Los círculos de influencia se definen para observar y estudiar las variantes de las diferentes fallas que se encuentran en estos radios, de manera que se pueda discutir la influencia de los segmentos y áreas de falla sobre los Espectros de Peligro Uniforme (Inca, 2013). En la tabla 3, se observan las fuentes sismogénicas y las características utilizadas para cada caso de estudio.

**Tabla 3.** Datos utilizados para el análisis de peligro sísmico de los casos de estudio para diferentes radios de influencia (Buenrostro, 2017)

| Nombre   | Municipio   | Latitud  | Longitud   | Tipo de Suelo | Fuentes sismogénicas           |  | Modelos de Atenuación       |
|----------|-------------|----------|------------|---------------|--------------------------------|--|-----------------------------|
|          |             |          |            |               | Fuentes Falla                  | Fuentes Área   |                             |
| GDL-200  | Guadalajara | 20.6766° | -103.3467° | Firme         | COL, MI-CO, JAL                | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, SUB2, BB, MVB                        | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| GDL-300  | Guadalajara | 20.6766° | -103.3467° | Firme         | JAL, COL, MI-CO, MI            | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, RIV3, SUB2, BB, MVB, NAM             | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| GDL-500  | Guadalajara | 20.6766° | -103.3467° | Firme         | JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, RIV3, SUB2, BB, MVB, NAM, RIV1, RIV2 | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| ZAP-200  | Zapopan     | 20.6866° | -103.3508° | Firme         | COL, MI-CO, JAL                | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, SUB2, BB, MVB                        | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| ZAP-300  | Zapopan     | 20.6866° | -103.3508° | Firme         | JAL, COL, MI-CO, MI            | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, RIV3, SUB2, BB, MVB, NAM             | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| ZAP-500  | Zapopan     | 20.6866° | -103.3508° | Firme         | JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, RIV3, SUB2, BB, MVB, NAM, RIV1, RIV2 | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| TLAQ-200 | Tlaquepaque | 20.6354° | -103.3053° | Firme         | COL, MI-CO, JAL                | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, SUB2, BB, MVB                        | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| TLAQ-300 | Tlaquepaque | 20.6354° | -103.3053° | Firme         | JAL, COL, MI-CO, MI            | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, RIV3, SUB2, BB, MVB, NAM             | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| TLAQ-500 | Tlaquepaque | 20.6354° | -103.3053° | Firme         | JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, RIV3, SUB2, BB, MVB, NAM, RIV1, RIV2 | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |

| Nombre   | Municipio  | Latitud  | Longitud   | Tipo de Suelo | Fuentes sismogénicas           |  | Modelos de Atenuación       |
|----------|------------|----------|------------|---------------|--------------------------------|--|-----------------------------|
|          |            |          |            |               | Fuentes Falla                  | Fuentes Área   |                             |
| TON-200  | Tonalá     | 20.6473° | -103.2673° | Firme         | COL, MI-CO, JAL                | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, SUB2, BB, MVB                        | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| TON-300  | Tonalá     | 20.6473° | -103.2673° | Firme         | JAL, COL, MI-CO, MI            | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, RIV3, SUB2, BB, MVB, NAM             | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| TON-500  | Tonalá     | 20.6473° | -103.2673° | Firme         | JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, RIV3, SUB2, BB, MVB, NAM, RIV1, RIV2 | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| TLAJ-200 | Tlajomulco | 20.4737° | -103.4479° | Firme         | COL, MI-CO, JAL                | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, SUB2, BB, MVB                        | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| TLAJ-300 | Tlajomulco | 20.4737° | -103.4479° | Firme         | JAL, COL, MI-CO, MI            | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, RIV3, SUB2, BB, MVB, NAM             | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| TLAJ-500 | Tlajomulco | 20.4737° | -103.4479° | Firme         | JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, RIV3, SUB2, BB, MVB, NAM, RIV1, RIV2 | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| SAL-200  | El Salto   | 20.5196° | -103.1784° | Firme         | COL, MI-CO, JAL                | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, SUB2, BB, MVB                        | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| SAL-300  | El Salto   | 20.5196° | -103.1784° | Firme         | JAL, COL, MI-CO, MI            | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, RIV3, SUB2, BB, MVB, NAM             | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |
| SAL-500  | El Salto   | 20.5196° | -103.1784° | Firme         | JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C | IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, RIV3, SUB2, BB, MVB, NAM, RIV1, RIV2 | YOU-1997, GA-2005, ARR-2010 |

En las figuras 7 (b), 7 (c) y 7 (d) se muestran el trazo de estos radios, para el centro de Guadalajara, uno de los puntos seleccionados para este caso de estudio. Se obtuvieron para cada uno de los radios de influencia EPU para los períodos de retorno mencionados en el párrafo anterior.

En la figura 8 se muestra una comparativa de los tres radios de influencia para los puntos del centro de Guadalajara, GDL-200, GDL-300 y GDL-500. En esta comparación se puede observar que para los radios de 200 km y 300 km los resultados se sobreponen, ya que una o algunas fallas que se encuentren a menos de 200 km puedan ser las que ocasionen un peligro mayor a la zona estudiada. En los EPU obtenidos para los 500 km aumentan ligeramente las ordenadas espectrales, en los períodos de 0 a 0.5 s; ya que la contribución de las demás fuentes es muy pequeña. Se tomó la decisión de utilizar un radio final de 500 km, que abarcará un mayor número de fuentes, para el análisis de peligro sísmico de cada uno de los puntos de la malla de la microzonificación de la ZMG.



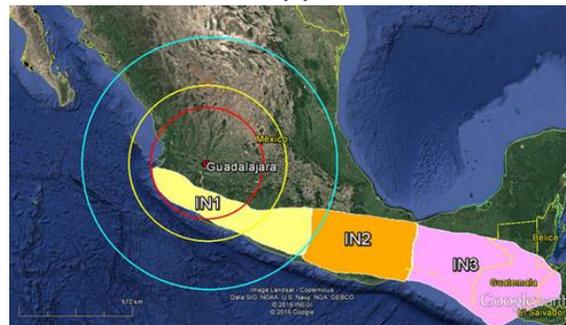
(a)



(b)

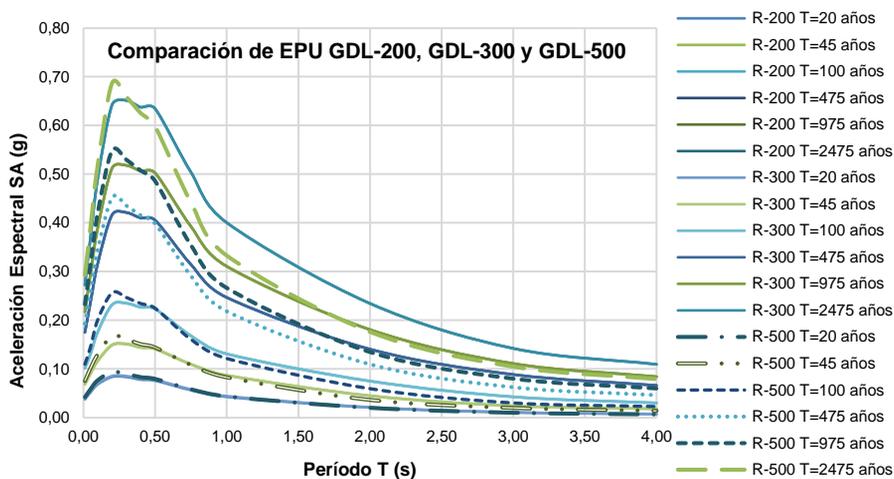


(c)



(d)

**Figura 7.** (a) Localización de los puntos para la selección de radios de influencia (b) Radios de influencia para segmentos de falla (c) Radios de influencia para áreas de sismos someros (d) Radios de influencia para áreas de sismos profundos



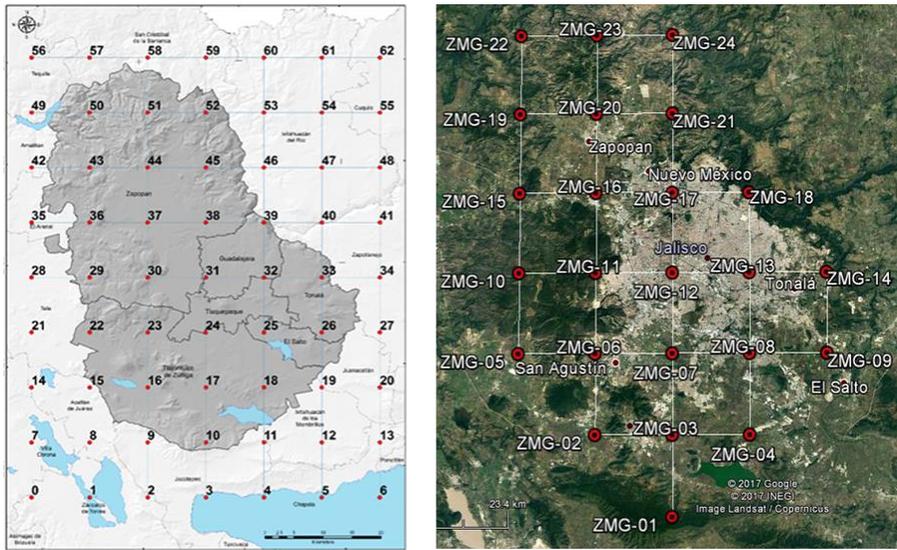
**Figura 8.** Espectros de peligro uniforme para tres radios en el punto “Guadalajara”, las curvas R=200 km y R=300 km (líneas sólidas) se superponen (Buenrostro, 2017)

### 3.2 Malla de interpolación (IDW)

Se realizó una malla de puntos con el fin de obtener una microzonificación de la ZMG y calcular los EPU a una distancia específica en cada una de estas intersecciones. Para elegir esta distancia se basó en la investigación realizada por Inca (2013), que mediante el método de Interpolación de Ponderación de Distancia Inversa (IDW), de Shepard (1968) concluyó, que se podía tener una buena aproximación de los EPU desconocidos, con distancias menores o iguales a 15 y 30 km debido a las cortas distancias entre ellas.

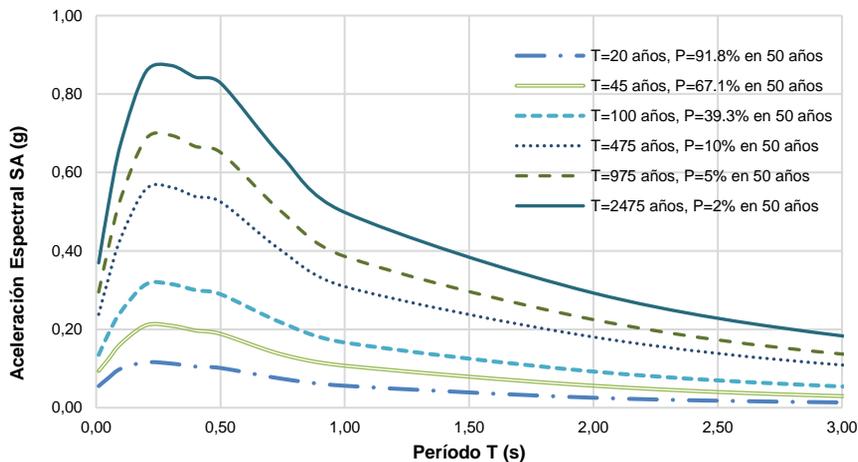
Para este estudio se tomó una distancia arbitraria de 10 km debido a que la extensión territorial de la ZMG no es muy grande. Por lo que se decidió refinar esta malla de esa forma y en consecuencia obtener resultados con buenas aproximaciones para la interpolación. En la figura 9 (izquierda), se observa esta malla, donde se localizaron 62 puntos para poder trazar la cuadrícula. Se identificaron los puntos que se encuentran dentro de los 6 municipios de la ZMG, (zona de color gris oscuro), quedando así, un total de 24 puntos para este estudio, como se observa en la figura 9 (derecha).

A estos puntos se les asignó una clave para distinguirlos y se obtuvieron sus ubicaciones exactas para el análisis (latitud y longitud). Se tomó un radio de influencia de fuentes de fallas de 500 km. Para cada punto se le dio una relación de atenuación a cada falla seleccionada dentro del radio de influencia, como en los casos de estudio desglosados en la tabla 3. Y, por último, se consideró una velocidad de onda de corte del suelo a 30m ( $V_{s30}$ ), mayor o igual a 760 m/s, para suponer un terreno firme o tipo roca, según los códigos americanos como el ASCE 7-16, para cada uno de los puntos, ya que los modelos de atenuación usados están calculados para esas características de suelo. Posteriormente, se aplicarán efectos de sitio sobre los EPU obtenidos mediante estudios geofísicos (en el capítulo 4 se explica de forma detallada).



**Figura 9.** Trazo de malla de interpolación con intersecciones a cada 10 km (izquierda) y malla de interpolación definitiva con 24 puntos (derecha) (Buenrostro, 2017)

En las figuras 10 y 11 se muestran los Espectros de Peligro Uniforme, obtenidos mediante el análisis de peligro sísmico, realizado para los puntos: ZMG-01 y ZMG-17. Como representación de los valores espectrales mayores y menores de los 24 puntos obtenidos en la malla de interpolación.



**Figura 10.** EPUs, obtenidos para el punto ZMG-01 (respuesta mayor), ubicado en el municipio de Tlajomulco (Buenrostro, 2017)

Las aceleraciones máximas para todos los EPUs, se ubican en los períodos bajos (0s a 0.5s), ya que se obtuvieron para terreno firme o roca, donde aproximadamente este tipo de suelo corresponde a períodos menores a 0.5 segundos. Se puede observar que el punto ZMG-01 (figura 10), es donde se tienen mayores

aceleraciones espectrales respecto a los 24 puntos calculados). Este punto se encuentra en Tlajomulco, y es el más cercano a las costas de Colima y de Jalisco. Por lo que, es muy probable que ese sea el motivo de las ordenadas de pseudoaceleración de mayor amplitud, y que se tenga un mayor peligro sísmico provocado por la subducción de la costa. En el EPU obtenido para el punto ZMG-17 en Zapopan (ver figura 11), las aceleraciones espectrales son menores que los demás puntos mostrados, ya que es el punto más alejado al Pacífico.

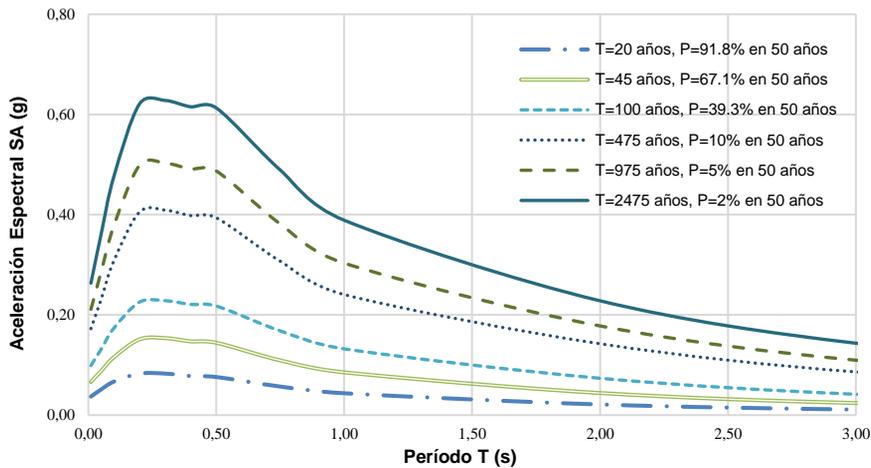


Figura 11. EPU, obtenidos para el punto ZMG-17 (respuesta menor), correspondiente al municipio de Zapopan (Buenrostro, 2017)

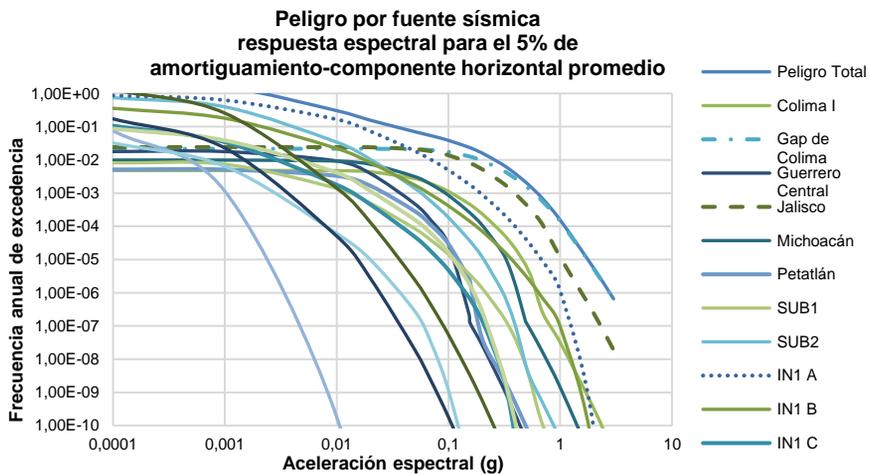
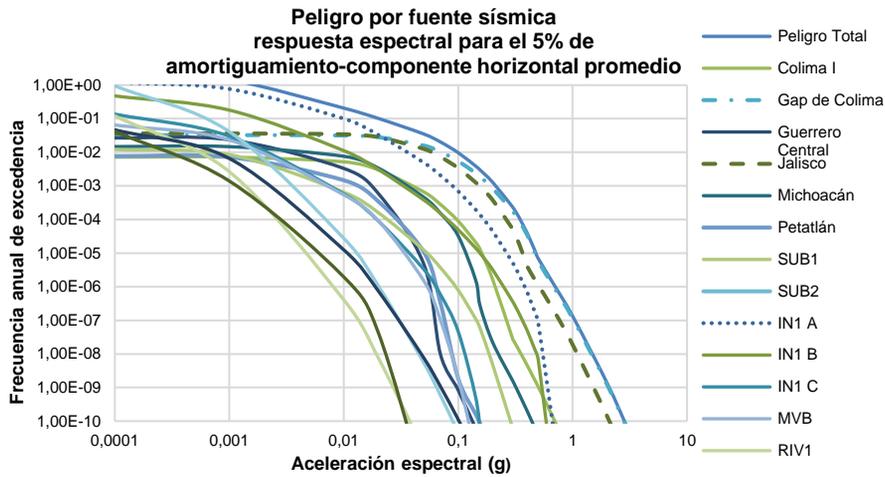


Figura 12. Curvas de peligro por fuente sísmica para el punto ZMG-01, para un  $T_s = 0.3$  s (Buenrostro, 2017)

Se muestran las contribuciones que cada falla aporta (ver figura 12 y 13), al peligro sísmico de los puntos ZMG-01 y ZMG-17 para un período de 0.3 segundos (período en donde la SA es mayor). En ambos casos se aprecia que las fallas que aportan un mayor peligro, son las fallas interplaca del Gap de Colima y de Jalisco y la falla

tipo área IN1-A (curvas con líneas punteadas en las gráficas); siendo los eventos de subducción los más importantes a considerar para este análisis.

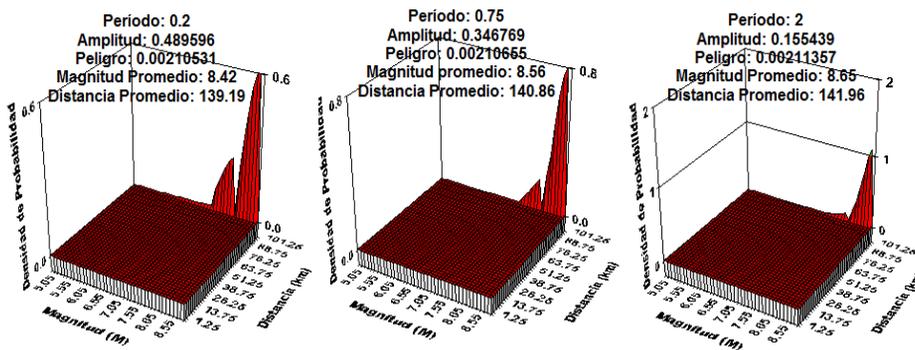


**Figura 13.** Curvas de peligro por fuente sísmica para el punto ZMG-17, para un  $T_s = 0.3$  s (Buenrostro, 2017)

### 3.3 Desagregación del peligro sísmico

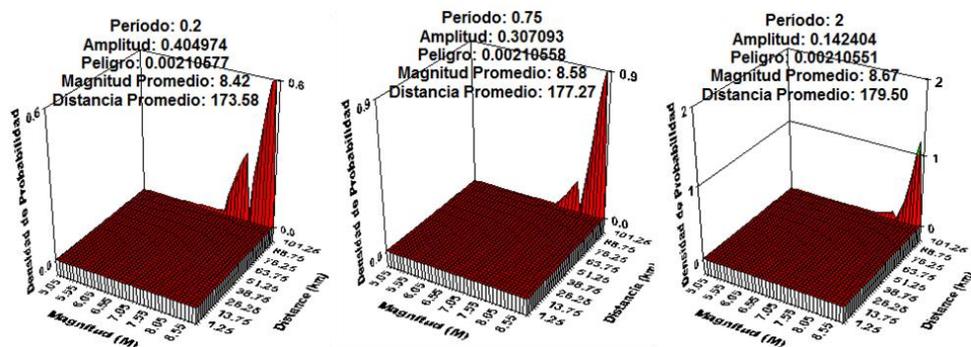
La desagregación del peligro sísmico, es una manera efectiva de identificar diferentes escenarios de eventos (expresados en términos de distancia – magnitud), que contribuyen al peligro sísmico de un sitio. El escenario de la contribución de los eventos al peligro sísmico de un sitio,  $C(M, R)$ , puede ser obtenido mediante la determinación de la distancia a la fuente ( $r$ ) desde el sitio, (Filiatrault *et al.*, 1998). Este proceso muestra la contribución a la frecuencia anual de excedencia de acuerdo a la magnitud, distancia y parámetros de desviación estándar de las relaciones de atenuación. Si el valor de aceleración ocurre en el lugar de interés para la evaluación de la amenaza, ciertas magnitudes, distancias y valores de desviación contribuyen a dicha aceleración más que otros. El proceso de desagregación muestra estas contribuciones relativas. Es posible analizar la variación de tres parámetros magnitud, distancia y densidad de probabilidad (Kramer, 1996).

Se realizó la desagregación del peligro sísmico para cada uno de los 24 puntos de la malla, para un  $r = 500$  km, para un período de retorno  $T_r = 475$  años, ya que es el período de retorno asociado a un espectro de diseño básico para estructuras tipo B, de acuerdo a la normativa de los municipios de Guadalajara y Zapopan. Se consideraron períodos de vibración de 0.2 s, 0.75 s y 2.0 s. Se eligieron estos períodos por el número de niveles promedio que tienen aproximadamente la mayoría de las edificaciones que se encuentran en la ZMG (2 a 20 niveles). En las figuras 14 y 15 se muestran los resultados de la desagregación con los parámetros mencionados en el párrafo anterior, para los puntos ZMG-01 y ZMG-17. Se muestra la desagregación de estos dos puntos debido a que son los que tienen valores de aceleraciones espectrales, mayores y menores respecto a los demás puntos analizados.



**Figura 14.** Desagregación del peligro sísmico (M y R) para el punto ZMG-01, para períodos 0.2 s, 0.75 s y 2 s (Buenrostro, 2017)

Se observa una magnitud promedio de 8.4 - 8.65. Las distancias promedio que arrojan para los tres puntos son diferentes por la localización en la que se encuentran. Por el tipo de magnitud que indica, y las distancias promedio, las fuentes sísmicas que están ocasionando un mayor peligro a la ZMG, son las de las costas de Jalisco y de Colima. Estos resultados sirvieron para corroborar lo que se había observado en las curvas de peligro por fuente sísmica. En todos los puntos de la malla se observaron resultados muy similares, por lo que estas características particulares producto de la desagregación, nos ayudaron, en la búsqueda de acelerogramas para los efectos de sitio aplicados en los EPU (la metodología usada es explicada en el capítulo 4).



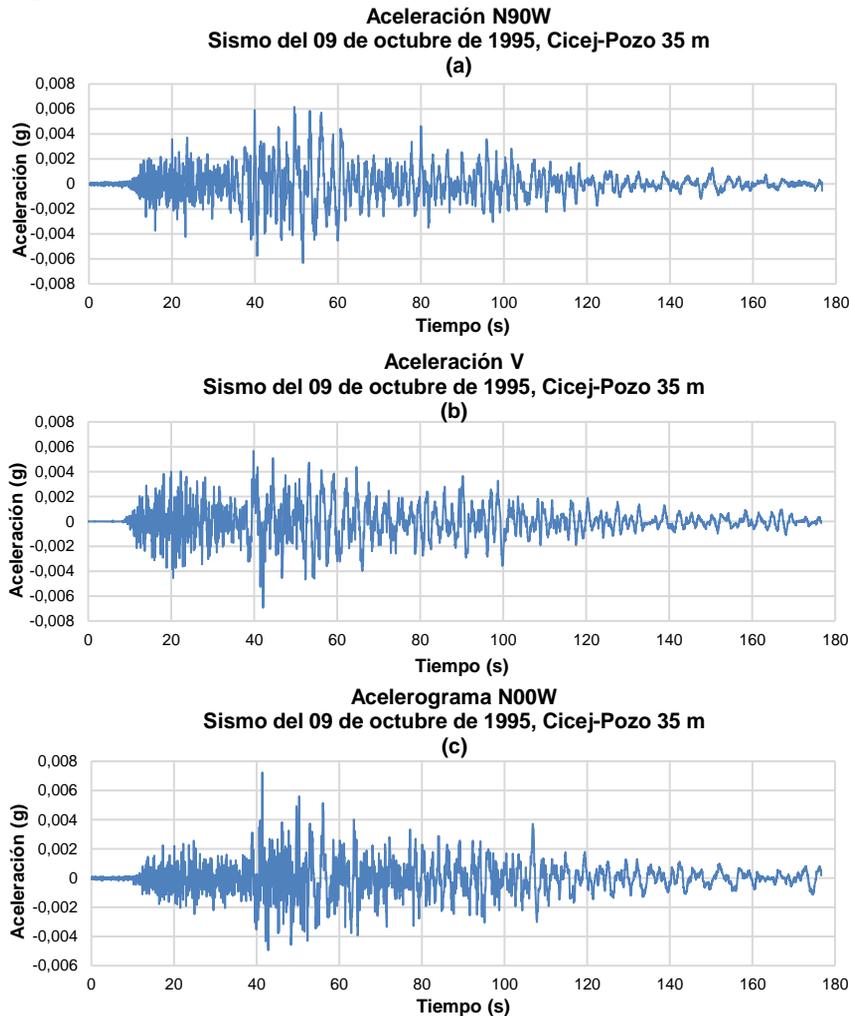
**Figura 15.** Desagregación del peligro sísmico (M y R) para el punto ZMG-17, para períodos 0.2 s, 0.75 s y 2 s (Buenrostro, 2017)

#### 4 ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME CON EFECTOS LOCALES

La desagregación del peligro sísmico obtenida, nos sirvió como parámetro para la búsqueda de acelerogramas, que estos a su vez, nos ayudarán a obtener la amplificación de los efectos locales, de las ondas de cuerpo del suelo de la zona estudiada. Se analizaron 14 registros de la ZMG, del sismo del 9 de octubre de 1995 ocurrido en Manzanillo, Colima. Los registros fueron obtenidos de la Base Mexicana

de Sismos Fuertes (BMSF) volumen 2, la cual tiene los acelerogramas registrados en la República Mexicana desde el año, 1960 a 1999. También se encontraron y analizaron 11 registros en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (I de I UNAM) para la ZMG, para los años del 2012 al 2015.

Se procesaron todos los datos, para las tres componentes de cada uno de los 25 registros (vertical, horizontal N-S y horizontal E-O) y se corrigieron por línea base, con un filtro tipo Butterworth con una frecuencia baja de 0.10 Hz y una frecuencia alta de 25 Hz, para obtener espectros de respuesta con un 5% de amortiguamiento.



**Figura 16.** Acelerogramas elegidos, registrados en tres diferentes componentes: horizontal N-S (11.a), vertical (11.b) y horizontal E-O (11.c)

Las características que se tomaron en cuenta para elegir un registro, y utilizarlo en la obtención de efectos locales del suelo, fueron las siguientes:

- Acelerogramas registrados en alguna estación acelerográfica de la Zona Metropolitana de Guadalajara.
- Registros de sismos con magnitud  $> 7$ .
- Acelerogramas de sismos ocurridos en la costa del Pacífico, con características sísmicas similares, a las del sismo del 3 de junio de 1932.
- Acelerogramas registrados en terreno firme o roca.

Debido a que la instrumentación sísmica de la ciudad de Guadalajara es escasa, se tomó la decisión de utilizar el registro de la estación: CICEJ Pozo 35m, del sismo 9 de octubre de 1995, el cual reunió con las características deseadas. En la figura 16, se muestran los acelerogramas del registro elegido en las tres componentes medidas.

#### 4.1 Funciones de transferencia

Una función de transferencia es la relación de amplificación que hay entre la base (terreno firme o roca) y la superficie libre. Para tener como resultado funciones de transferencia de nuestros suelos, se requieren ecuaciones de onda, que puedan obtener la amplificación entre 2 estratos, sus deformaciones y aceleraciones (Gómez-Bernal *et al.*, 2007).

Para esta investigación, se desea obtener la respuesta del suelo suponiendo propagación vertical de ondas de cortante, para este fin se utilizó el programa de cómputo, SHAKE-91\_input (Idriss & Sun, 1992), versión 2013, que utiliza el método lineal equivalente. Este método, puede tener una aproximación acertada de los efectos no lineales del suelo en la respuesta, llevando a cabo una secuencia de análisis lineales, que consideran valores constantes del módulo de rigidez de la relación de amortiguamiento. Para obtener la amplificación del suelo, se modeló cada estrato de cada uno de los 18 perfiles de suelo del poniente de la ZMG, los cuales fueron proporcionados por Lazcano (2012). Se modeló, la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), peso volumétrico ( $\gamma$ ) y amortiguamiento mínimo, se le asignó una curva de degradación de rigidez y amortiguamiento para cada estrato. Las curvas usadas fueron las de Seed & Idriss (1970), para arenas promedio. Los 18 perfiles de suelo y sus características geofísicas obtenidas con un estudio de REMI (Refracción de Microtremores) se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4.** Perfiles de suelo (Lazcano, 2012 y 2016)

| Número | Ubicación                              | Municipio   | Estratos                      | 1       | 2        | 3       | 4      | 5       | 6     |
|--------|--|-------------|-------------------------------|---------|----------|---------|--------|---------|-------|
| 1      | Catedral de Guadalajara                | Guadalajara | Profundidad (m)               | 0 - 3   | 3 - 6    | 6 - 9   | 9 - 22 | 22 - 32 | > 32  |
|        |  |             | $V_s$ (m/s)                   | 152     | 186      | 396     | 262    | 443     | 880   |
|        |  |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 12.60   | 14.10    | 15.00   | 14.10  | 16.60   | 17.20 |
|        |  |             | T (s) 30m                     | 0.47    |          |         |        |         |       |
| 2      | Antigua Biblioteca Pública (Agua Azul) | Guadalajara | Profundidad (m)               | 0 - 4   | 4 - 9    | 9 - 25  | > 25   |         |       |
|        |  |             | $V_s$ (m/s)                   | 180     | 123      | 309     | 1300   |         |       |
|        |  |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 14.10   | 12.40    | 14.80   | 17.40  |         |       |
|        |  |             | Ts (s) 30m                    | 0.45    |          |         |        |         |       |
| 3      | Registro Civil No.1                    | Guadalajara | Profundidad (m)               | 0 - 1.5 | 1.5 - 10 | 10 - 32 | > 32   |         |       |
|        |  |             | $V_s$ (m/s)                   | 143     | 298      | 363     | 1260   |         |       |
|        |  |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 12.50   | 14.80    | 14.80   | 17.30  |         |       |
|        |  |             | Ts (s) 30m                    | 0.41    |          |         |        |         |       |

| Número | Ubicación                                       | Municipio   | Estratos                      | 1       | 2         | 3         | 4         | 5     | 6 |
|--------|---|-------------|-------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-------|---|
| 4      | Fco. Javier Gamboa y Lerdo de Tejada            | Guadalajara | Profundidad (m)               | 0 - 4.5 | 4.5 - 11  | 11 - 50   | > 50      |       |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 154     | 369       | 382       | 850       |       |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 12.6    | 14.7      | 14.70     | 17.20     |       |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.58    |           |           |           |       |   |
| 5      | Hotel Riu Plaza, López Mateos y Lázaro Cárdenas | Guadalajara | Profundidad (m)               | 0 - 5   | 5 - 13    | 13 - 53   | 53 - 54   | > 54  |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 180     | 290       | 450       | 235       | 950   |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 14.00   | 14.8      | 16.10     | 14.80     | 17.20 |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.60    |           |           |           |       |   |
| 6      | Centro comercial, La Gran Plaza                 | Zapopan     | Profundidad (m)               | 0 - 5   | 5 - 11    | 11 - 57   | > 57      |       |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 165     | 290       | 575       | 1000      |       |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 13.2    | 14.8      | 16.30     | 17.30     |       |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.52    |           |           |           |       |   |
| 7      | Patria y Guadalupe                              | Zapopan     | Profundidad (m)               | 0 - 3   | 3 - 12    | 12 - 44   | > 44      |       |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 167     | 217       | 596       | 1200      |       |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 13.2    | 14.5      | 16.40     | 17.30     |       |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.45    |           |           |           |       |   |
| 8      | Universidad Panamericana Campus Gdl, Cd. Granja | Zapopan     | Profundidad (m)               | 0 - 6   | 6 - 11    | 11 - 24   | 24 - 62   | > 62  |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 175     | 260       | 420       | 610       | 860   |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 13.4    | 14.6      | 16.10     | 16.50     | 17.00 |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.63    |           |           |           |       |   |
| 9      | López Mateos y Mariano Otero                    | Zapopan     | Profundidad (m)               | 0 - 3   | 3 - 11    | 11 - 25   | 25 - 85   | > 62  |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 185     | 260       | 445       | 450       | 800   |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 13.40   | 14.60     | 16.20     | 16.20     | 17.00 |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.80    |           |           |           |       |   |
| 10     | Colomos y Manuel M. Diéguez                     | Guadalajara | Profundidad (m)               | 0 - 3   | 3 - 9     | 9 - 31    | > 31      |       |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 188     | 253       | 399       | 1400      |       |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 13.5    | 14.5      | 16.00     | 17.30     |       |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.37    |           |           |           |       |   |
| 11     | Eulogio Parra y Pablo Casals                    | Guadalajara | Profundidad (m)               | 0 - 1.5 | 1.5 - 4.5 | 4.5 - 7.5 | 7.5 - 60  | > 60  |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 95      | 215       | 255       | 570       | 1000  |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 12.5    | 14.3      | 14.50     | 16.40     | 17.10 |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.53    |           |           |           |       |   |
| 12     | Pablo Neruda y Paseo Jacarandas                 | Guadalajara | Profundidad (m)               | 0 - 2   | 2 - 9     | 9 - 34    | > 34      |       |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 158     | 220       | 420       | 950       |       |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 13.1    | 14.5      | 16.10     | 17.00     |       |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.41    |           |           |           |       |   |
| 13     | Punto Sao Paulo, Prol. Av. Américas y Sao Paulo | Guadalajara | Profundidad (m)               | 0 - 1   | 1 - 4     | 4 - 9     | > 9       |       |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 95      | 225       | 339       | 1400      |       |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 12.5    | 14.5      | 15.20     | 17.20     |       |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.16    |           |           |           |       |   |
| 14     | Patria y Eva Briseño                            | Zapopan     | Profundidad (m)               | 0 - 2   | 2 - 6.5   | 6.5 - 10  | 10 - 17   | > 17  |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 123     | 180       | 250       | 612       | 1900  |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 12.9    | 14.5      | 14.70     | 16.50     | 17.30 |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.26    |           |           |           |       |   |
| 15     | Patria y Paseo Royal Country                    | Zapopan     | Profundidad (m)               | 0 - 4   | 4 - 14    | 14 - 46   | > 46      |       |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 180     | 448       | 513       | 1200      |       |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 14.50   | 15.40     | 16.10     | 17.10     |       |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.43    |           |           |           |       |   |
| 16     | Paseo Valle Real y Federalistas                 | Zapopan     | Profundidad (m)               | 0 - 2   | 2 - 5     | 5 - 10.5  | 10.5 - 38 | > 38  |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 111     | 196       | 607       | 696       | 1200  |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 12.5    | 14.6      | 16.30     | 16.40     | 17.10 |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.33    |           |           |           |       |   |
| 17     | Periférico y Laureles                           | Zapopan     | Profundidad (m)               | 0 - 2.5 | 2.5 - 8.5 | 8.5 - 23  | 23 - 72   | > 72  |   |
|        |   |             | Vs (m/s)                      | 216     | 289       | 445       | 624       | 1900  |   |
|        |   |             | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 14.60   | 14.70     | 16.20     | 16.60     | 17.40 |   |
|        |   |             | Ts (s) 30m                    | 0.57    |           |           |           |       |   |

| Número | Ubicación   | Municipio | Estratos                      | 1     | 2     | 3      | 4       | 5     | 6 |
|--------|---|-----------|-------------------------------|-------|-------|--------|---------|-------|---|
| 18     | Nueva Biblioteca Pública, Periférico y Parres Arias | Zapopan   | Profundidad (m)               | 0 - 3 | 3 - 8 | 8 - 14 | 14 - 37 | > 37  |   |
|        |   |           | Vs (m/s)                      | 144   | 280   | 350    | 367     | 1000  |   |
|        |   |           | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 13.10 | 14.70 | 15.50  | 15.50   | 17.00 |   |
|        |   |           | Ts (s) 30m                    | 0.47  |       |        |         |       |   |

#### 4.1.1 Interpolación de EPU

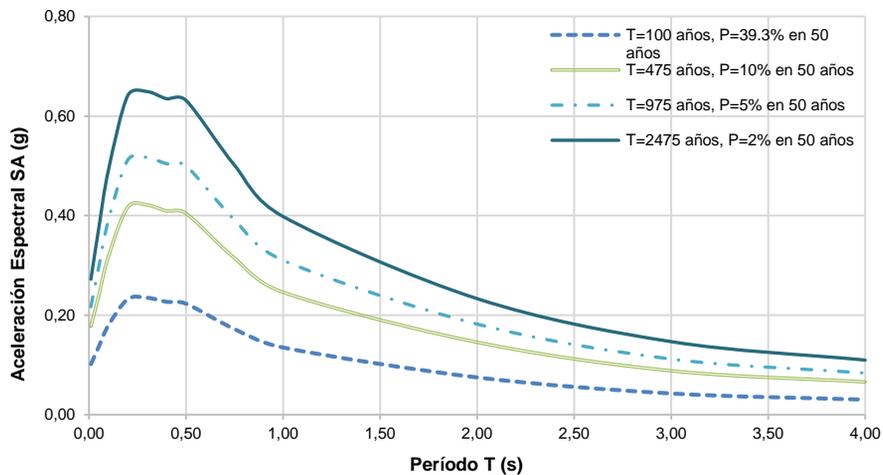
Para obtener efectos de sitio, son necesarias las aceleraciones espectrales en terreno firme de un punto en específico, en este caso para los puntos de los perfiles de suelo (tabla 4).

Se realizó una interpolación utilizando el método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW), de Shepard (1968), para cada punto de los 18 mostrados en la tabla 4, se determinaron sus Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme con la ayuda de la malla de interpolación desarrollada en el capítulo 3. Se obtuvieron los EPU para cuatro períodos de retorno, 100 años, representando aceleraciones para estructuras tipo C, 475 años, para estructuras tipo B, 975 años para estructuras tipo A, y 2475 años para estructuras especiales (estructuras de mayor importancia).

En la figura 17 se observa la localización del punto 10, “Colomos y Manuel M. Diéguez”, respecto a los 24 puntos de la malla de interpolación, y el resultado de las aceleraciones espectrales obtenidas por la interpolación entre los puntos ZMG-17, ZMG-18, ZMG-12 y ZMG-13 en la figura 18.



**Figura 17.** Localización del punto 10, “Colomos y Manuel M. Diéguez” respecto a los puntos de la malla de interpolación (Buenrostro, 2017)



**Figura 18.** EPU punto 10 “Colomos y Manuel M. Diéguez”, producto de una interpolación (IDW) (Buenrostro, 2017)

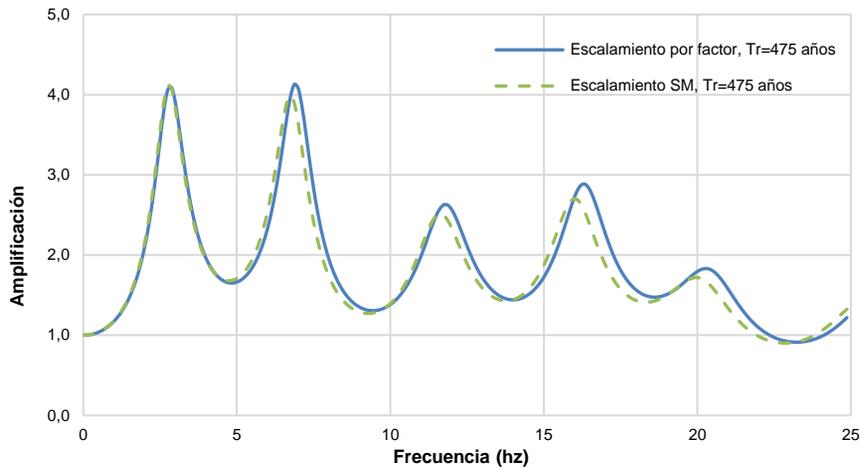
#### 4.1.2 Ajustes de acelerogramas a los Espectros de Peligro Uniforme

Después de modelar los estratos del suelo, se debe aplicar un movimiento o excitación en la base, en este caso en terreno firme. El acelerograma que se usará es el registrado en la estación CICEJ Pozo 35m, con aceleraciones máximas de 6.46, 5.96 y 6.96  $\text{cm/s}^2$ , para los canales N90W, V y N00W, respectivamente, mostrado en la figura 16. Como se observa las aceleraciones son pequeñas por lo que, la señal se debe de escalar al EPU, de cada punto deseado. Para este estudio se realizaron dos técnicas de ajustes de espectros y se compararon, para decidir, cuál sería el más apropiado. El primer método fue la técnica de Ajuste de Espectros (Spectral Match), el cual implica modificar el contenido de las frecuencias de los registros sísmicos utilizados (inicial) o registros semilla, hasta que logren empatar con el espectro deseado (objetivo) teniendo así un espectro y/o acelerograma ajustado. Esta metodología se desarrolló por Al Atik y Abrahamson (2010), la cual se implementó en el programa de cómputo RspMatch 2009. Para esta investigación se utilizó el apartado de Spectral Matching del programa EZ-FRISKv7.65<sup>TM</sup>, donde se incluye la metodología mencionada en el párrafo anterior. En la figura 19, se observa una comparación entre las dos funciones transferencia, obtenidas por los dos métodos de escalamiento usados para un período de retorno de 475 años, para el perfil de suelo del punto 10 de los 18 antes mencionados, “Colomos y Manuel M. Diéguez”.

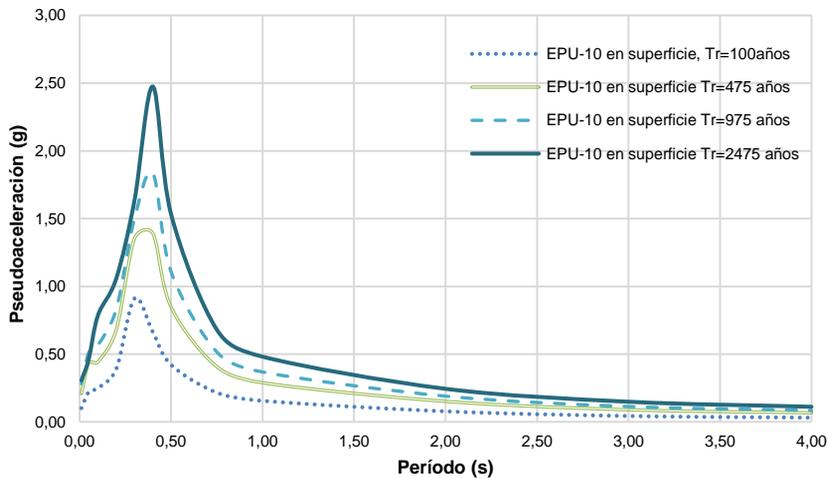
Se puede apreciar que los resultados son similares, pero en el ajuste de espectros que se hizo por la técnica de ajuste de espectro “spectral matching” (color verde), se observa que es ligeramente menor la respuesta, debido a que en esta técnica lo que se cuida es el contenido de frecuencias más que las aceleraciones, por lo que existe una pequeña pérdida de datos. Se llegó a la conclusión de usar para los 18 perfiles de suelo que se tienen de la ZMG, el segundo método de escalamiento por amplitud. Usando para todos los casos el acelerograma registrado en la estación CICEJ Pozo 35m, en las dos componentes horizontales N-S y E-O.

Una vez obtenidas las funciones de transferencia diferentes para cada EPU, con diferentes períodos de retorno, se multiplicaron directamente con el EPU (IDW) en terreno firme en términos de frecuencias, para así conseguir los espectros de los 18 puntos afectados con el sitio.

En la figura 20 se muestran los espectros de sitio transparentes o EPUs con efectos de sitio para el punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", con la técnica de escalamiento elegida, para períodos de retorno de 100, 475, 975 y 2475 años, en el sentido N-S (el mayor registrado).



**Figura 19.** Comparación de las funciones de transferencia para el punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez"



**Figura 20.** Espectros de respuesta elástica en la superficie para el perfil de "Colomos y Manuel M. Diéguez", registrados en la dirección N-S

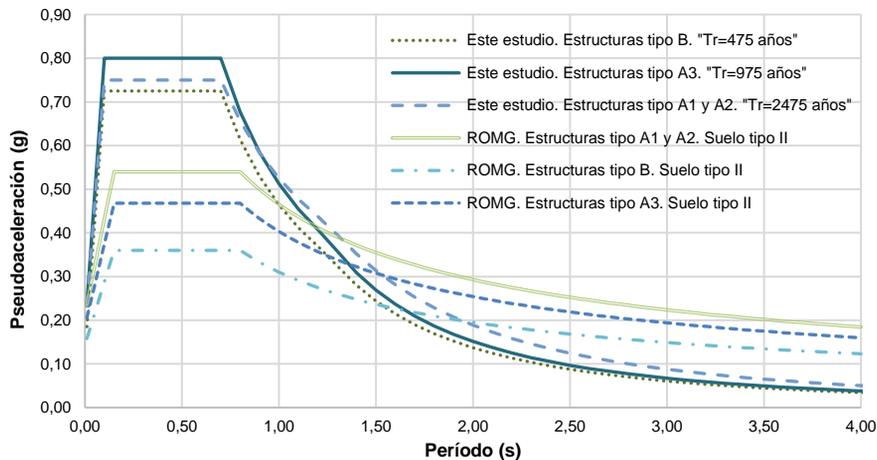
## 5 ANÁLISIS COMPARATIVO CON ESPECTROS DE DISEÑO

### 5.1 Comparación con la reglamentación actual del sitio estudiado

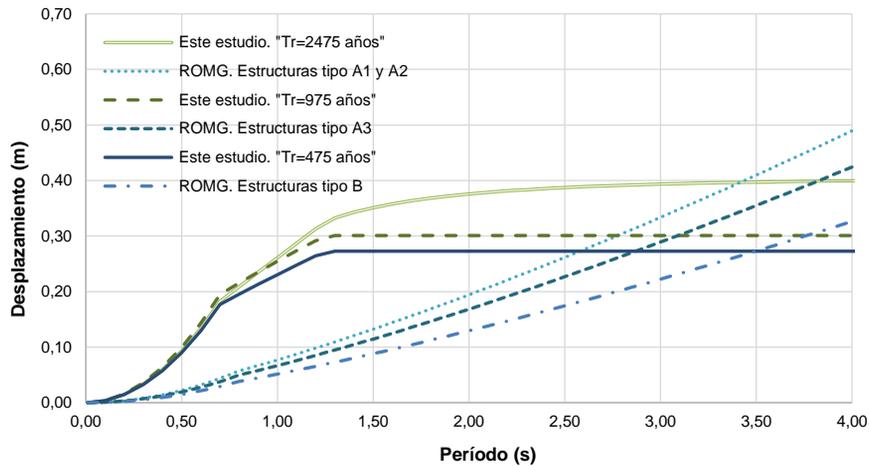
Se analizó la reglamentación actual de la ciudad de Guadalajara (ROMG,1997), y la del municipio de Zapopan (RCDUMZ, 2003) y se realizó una serie de comparaciones de estos reglamentos, contra los Espectros de Diseño en terreno firme y en superficie obtenidos en este trabajo, para los puntos de la “Catedral de Guadalajara” (Latitud: 20.677, Longitud: -103.347), y “Colomos y Manuel M. Diéguez” (Latitud: 20.692, Longitud -103.371), ambos ubicados en el municipio de Guadalajara.

Los EPU en terreno firme y en superficie (filtrados), para ejemplificarlos como un espectro de diseño, se les aplicó una meseta y curvas ascendentes y descendentes, también fueron afectados por un factor de sobrerresistencia de 2, ya que la comparación se hace con espectros de diseño, que, aunque estos últimos se obtengan sin un Q', eso no nos indica que sean totalmente “transparentes”, ya que tienen la sobrerresistencia implícita. La comparativa contra los espectros en superficie “filtrados” contra el ROMG,1997 para el punto 1 “Catedral de Guadalajara”, se pueden apreciar en la figura 21 donde las caídas de las curvas de los espectros propuestos por este análisis son controladas a diferencia de las del Reglamento de Guadalajara.

Se obtuvieron, los espectros de desplazamientos para los espectros de diseño propuestos y para los del ROMG, 1997 (ver figura 22), donde son notables las diferencias, ya que los espectros del ROMG, 1997 tienden a infinito, y como consecuencia dan mayores desplazamientos en las edificaciones. Se controlaron las caídas de las curvas con los parámetros “k” y “r”, en los espectros de diseño propuestos. Estas comparativas también se analizaron para terreno firme tipo I.



**Figura 21.** Comparación de espectros de diseño del ROMG, 1997, con los espectros de diseño obtenidos en superficie (propuestos) del punto 1, “Catedral de Guadalajara”, para suelos tipo II



**Figura 22.** Comparación de espectros de desplazamientos del ROMG, 1997, con los espectros de desplazamientos obtenidos en el punto 1, “Catedral de Guadalajara”, para suelos tipo II

Se trabajó en la segunda comparación con el Reglamento Orgánico del Municipio de Guadalajara, 1997 y el punto 10, “Colomos y Manuel M. Diéguez”, para los mismos tipos de estructuras y suelos que en el punto anterior, ya que sus características geotécnicas son equiparables con las características de los suelos terreno II que describe el ROMG, 1997. También se realizaron algunas comparaciones con los Espectros de Diseño del RCDUMZ, 2003 (Zapopan), para estructuras tipo “A3”, “A1 y A2” y “B”, de terreno tipo I y los Espectros de Diseño en terreno firme y en superficie para el punto 16, “Paseo Valle Real y Federalistas” (Latitud: 20.7209, Longitud: -103.4361), para estructuras tipo “Especiales”, “A” y “B”.

En las tablas 5 y 6 se pueden notar los PGA de los Espectros de Diseño (ED) reducidos en roca y en superficie para el punto 1, “Catedral de Guadalajara” y el punto 10, “Colomos y Manuel M. Diéguez”, contra el Reglamento Orgánico Municipal de Guadalajara, 1997, para los terrenos I y II, respectivamente. Donde se puede observar que, son muy parecidos los valores en roca o terreno I de ambos puntos, pero, es importante tomar como referencia el punto 10, ya que tiene amplificaciones mayores, que los de la Catedral, debido a la amplificación de las ondas del suelo, y a pesar de ello ambos se catalogarían como un terreno II en el ROMG, 1997.

**Tabla 5.** Comparación de PGA, “Catedral de Guadalajara” contra el Reglamento Orgánico del Municipio de Guadalajara, 1997

| PGA en roca “Catedral de Guadalajara” contra “ROMG, 1997” terreno I |      |                        | PGA en superficie, Tr = 475 años “Catedral de Guadalajara” contra “ROMG, 1997” terreno II |       |                         |
|---|------|------------------------|---|-------|-------------------------|
| PGA(g)  | ED   | ROMG, 1997 (Terreno I) | PGA(g)  | ED    | ROMG, 1997 (Terreno II) |
| Tipo B  | 0.21 | 0.36                   | Tipo B  | 0.725 | 0.36                    |
| Tipo A/A1, A2   | 0.26 | 0.54                   | Tipo A/A1, A2   | 0.80  | 0.54                    |
| Tipo Especiales/A3  | 0.33 | 0.468                  | Tipo Especiales/A3  | 0.75  | 0.468                   |

**Tabla 6.** Comparación de PGA, “Colomos y Manuel M. Diéguez” contra el Reglamento Orgánico del Municipio de Guadalajara, 1997

| PGA en roca “Colomos y Manuel M. Diéguez”<br>contra “ROMG, 1997” terreno I |      |                           | PGA en superficie, Tr = 475 años “Colomos y Manuel M. Diéguez”<br>contra “ROMG, 1997” terreno II |      |                            |
|--|------|---------------------------|--|------|----------------------------|
| PGA(g)   | ED   | ROMG, 1997<br>(Terreno I) | PGA(g)   | ED   | ROMG, 1997<br>(Terreno II) |
| Tipo B   | 0.21 | 0.36                      | Tipo B   | 0.7  | 0.36                       |
| Tipo A/A1, A2  | 0.26 | 0.54                      | Tipo A/A1, A2  | 0.92 | 0.54                       |
| Tipo Especiales/A3   | 0.32 | 0.468                     | Tipo Especiales/A3   | 1.24 | 0.468                      |

También se pueden apreciar en la tabla 7, los PGA del punto 16, “Paseo Valle Real y Federalistas” en roca y en superficie contra la normatividad vigente del municipio de Zapopan, RCDUMZ, 2003, para terreno I. El punto de Paseo Valle Real y Federalistas, es muy ambiguo ya que los espectros en roca y en superficie entran en la misma categoría de suelo, según la clasificación de los reglamentos de Guadalajara y de Zapopan, por lo cual la comparativa se realiza solo para terreno I.

**Tabla 7.** Comparación de PGA, Paseo Valle Real y Federalistas contra el Reglamento de Construcciones y Desarrollo Urbano del Municipio de Zapopan, 2003

| PGA en roca “Paseo Valle Real y Federalistas”<br>contra “RCDUMZ, 2003” terreno I |      |                             | PGA en superficie, Tr = 475 años “Paseo Valle Real y Federalistas”<br>contra “RCDUMZ, 2003” terreno I |      |                             |
|--|------|-----------------------------|---|------|-----------------------------|
| PGA(g)   | ED   | RCDUMZ, 2003<br>(Terreno I) | PGA(g)  | ED   | RCDUMZ, 2003<br>(Terreno I) |
| Tipo B   | 0.21 | 0.36                        | Tipo B  | 0.6  | 0.36                        |
| Tipo A/A1, A2  | 0.26 | 0.54                        | Tipo A/A1, A2   | 0.76 | 0.54                        |
| Tipo Especiales/A3   | 0.32 | 0.468                       | Tipo Especiales/A3  | 0.98 | 0.468                       |

## 5.2 Comparación con PRODISIS del Manual de Obras Civiles de la CFE, 2015

Se obtuvieron EPU's en terreno firme en el programa de cómputo PRODISISv4.1, de CFE, 2015, para períodos de retorno de 100 años, 475 años, 975 años, y 2475 años, para cada uno de los tres sitios anteriormente comparados. Los parámetros sísmicos, varían para cada punto y para cada periodo de retorno, por lo que los espectros que se obtengan con este programa de cómputo, son directamente comparados, con los EPU's en terreno firme o roca de este estudio. A ninguno de los EPU's se les aplicó alguna sobrerresistencia ya que los resultados que arroja el PRODISISv4.1, son “transparentes”, y/o “elásticos”. En la tabla 8, se muestra ésta comparativa. Donde es posible notar que los EPU's en roca obtenidos en PRODISIS, son menores que los conseguidos en este estudio. A pesar de que en las recomendaciones del MDOC 2015, se indica que los espectros de respuesta en roca para un período de retorno específico, son espectros realizados con un enfoque probabilista, la diferencia de las ordenadas espectrales podría darse, en la metodología y criterios utilizados en la obtención de estos EPU's.

**Tabla 8.** Comparación de PGA, de EPU's elásticos contra el PRODISISv4.1

| PGA en EPU's transparentes en roca "Catedral de Guadalajara" contra "PRODISIS, 2015" |      |               | PGA en EPU's transparentes en roca "Colomos y Manuel M. Diéguez" contra "PRODISIS, 2015" |      |               | PGA en EPU's transparentes en roca "Paseo Valle Real y Federalistas" contra "PRODISIS, 2015" |      |               |
|--|------|---------------|--|------|---------------|--|------|---------------|
| PGA(g)   | EPU  | PRODISIS v4.1 | PGA(g)   | EPU  | PRODISIS v4.1 | PGA(g)   | EPU  | PRODISIS v4.1 |
| Tr=100 años  | 0.24 | 0.1           | Tr=100 años  | 0.24 | 0.1           | Tr=100 años  | 0.23 | 0.1           |
| Tr=475 años  | 0.43 | 0.23          | Tr=475 años  | 0.42 | 0.23          | Tr=475 años  | 0.42 | 0.23          |
| Tr=975 años  | 0.52 | 0.33          | Tr=975 años  | 0.52 | 0.33          | Tr=975 años  | 0.51 | 0.34          |
| Tr=2475 años   | 0.66 | 0.53          | Tr=2475 años   | 0.65 | 0.54          | Tr=2475 años   | 0.64 | 0.54          |

## 6 CONCLUSIONES

Se estudió el peligro sísmico para la Zona Metropolitana de Guadalajara, ubicada en el estado de Jalisco. Se realizó una microzonificación, mediante una malla, con intersecciones a cada 10 km, en donde cada intersección es un punto. Para cada punto se obtuvo un Espectro de Peligro Uniforme (EPU), para diferentes períodos de retorno y/o probabilidades de excedencia. Se asoció un EPU de un período de retorno específico, para el diseño de un tipo de estructura, quedando un Tr=100 años como equivalente a un espectro de diseño de estructuras de tipo "C", un Tr=475 años a las estructuras tipo "B", un Tr=975 años a las estructuras tipo "A" y las "Especiales", equivalentes a un Tr=2475 años.

Se realizaron comparaciones para tres puntos (Catedral de Guadalajara, Colomos y Manuel M. Diéguez y Paseo Valle Real y Federalistas), de los 18 puntos obtenidos con efectos de sitio, con la normatividad vigente del municipio de Zapopan y Guadalajara. Para poder hacer una comparación directa se tomaron los espectros de los reglamentos (RCDUMZ, 2003 y ROMG, 1997), sin un factor de ductilidad, y se compararon con los obtenidos de los EPU en superficie. Se tomaron tres puntos en donde la respuesta de aceleración espectral en la superficie fuera diferente. Los tres espectros elegidos, se utilizaron como ejemplo para reducirlos por un valor de sobrerresistencia de 2 y aplicarle una meseta, la cual cubre las aceleraciones máximas del espectro y el período del suelo. De esta forma se pudieron comparar los espectros de diseño de los reglamentos con los espectros reducidos. Las comparaciones también se realizaron con el programa de cómputo PRODISISv4.1, 2015. Se utilizaron los EPU en terreno firme elásticos, de los tres puntos, para poder ser comparados con los espectros que arroja PRODISISv4.1.

Se observó que las respuestas espectrales en terreno firme o terreno I para los reglamentos de Zapopan y Guadalajara son mayores que los mostrados en éste estudio, pero que para un terreno tipo II, es todo lo contrario, ya que los espectros de las normativas no distinguen en aceleración según cambie de terreno, sino, sólo amplifica el tamaño de la meseta, dejando una gran incertidumbre en la amplificación de los suelos de la ZMG.

Se puede apreciar que la clasificación de los suelos del RCDUMZ, 2003 y ROMG, 1997, no es muy apropiada, ya que pueden entrar varios tipos de suelos (con características dinámicas muy diferentes) en un mismo terreno, dejando abierta la opción de hacer diferentes interpretaciones del reglamento y corriendo el riesgo

de subdiseñar o sobrediseñar las edificaciones de la ciudad. Lo ideal es actualizar la clasificación de suelos, con base en estudios geotécnicos y geofísicos recientes, y dejar de lado esta clase de incongruencias.

Con las comparativas realizadas se puede apreciar que los espectros de diseño de ambos reglamentos analizados en esta investigación (RCDUMZ, 2003 y ROMG, 1997), necesitan una actualización y este estudio ofrece parámetros para continuar con la investigación y proponer espectros y parámetros de diseño sísmico adecuados para la Zona Metropolitana de Guadalajara.

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT - 419647) por la beca de estudios de maestría y al Dr. Miguel Zamora Palacios y Dr. José Luis Rangel Núñez que aportaron valiosas opiniones sobre la investigación. Y al MSc. Salvador Lazcano Díaz del Castillo, quien proporcionó los estudios geofísicos del poniente de la ZMG. Los tres autores agradecen a la Universidad Autónoma Metropolitana por las facilidades proporcionadas a la realización de este trabajo como la compra de las licencias de los programas de cómputo utilizadas en los análisis.

## REFERENCIAS

1. Aguiar, R., & Rivas, A. (2018). Estudio Probabilístico de la Peligrosidad Sísmica de Ambato, en roca. *Microzonificación Sísmica de Ambato, Primera Edición*, 1-22.
2. Al Atik, L. and Abrahamson, N. (2010). An improved method for nonstationary spectral matching. *Earthquake spectra* 26(3), 601–617.
3. Arboleda, J., & Ordaz, M. (1993). Un mejor uso de los datos estadísticos para estimación de la sismicidad local. In *Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica* (pp. 21-27).
4. Arroyo, D., García, D., Ordaz, M., Mora, M. and Singh, S. (2010). Strong ground motion relations for Mexican interplate earthquakes. *Journal of Seismology* 14(4), 769-785.
5. ASCE/SEI 7-16 (2016). American Society of Civil Engineers.
6. Atkinson, G. M., & Boore, D. M. (2003). Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4), 1703-1729.
7. Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes. (2000). Comité de la Base Nacional de datos de Sismos Fuertes volumen 2, CD-ROM.
8. Buenrostro, A. M. (2017). *Análisis de peligro sísmico para la Zona Metropolitana de Guadalajara* (Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información).

9. CFE. (2015). Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad.
10. Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 58(5), 1583–1606.
11. Cornell, C. A., & Vanmarcke, E. H. (1969, January). The major influences on seismic risk. In *Proceedings of the fourth world conference on earthquake engineering* (Vol. 1, pp. 69-83).
12. Filiatrault, A., Tremblay, R., Christopoulos, C., Folz, B. & Pettinga, D., (1998). Elements of earthquake engineering and structural dynamics. *Presses Internationales Polytechnique*. Third edition.
13. García, D., Singh, S.K., Herraíz, M., Ordaz, M. & Pacheco, J. F. (2005). Inslab earthquakes of central Mexico: Peak ground-motion parameters and response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America* 95(6), 2272-2282.
14. Gómez-Bernal, A., Juárez-García, H. y Gama A. (2007). Amplificación sísmica en Chilpancingo, Guerrero. Reporte de Investigación, (456).
15. Google. (2017). Google Earth. <http://earth.google.com/>, (último acceso, julio 2017).
16. Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1954). Seismicity of the Earth (and associated phenomena), Princeton University Press, Princeton, NJ, EUA.
17. Idriss, I. M., & Sun, J. I. (1992). SHAKE-91, University of California, Davis, California.
18. Inca, E. (2013). *Estudio de peligro sísmico para la ciudad de Ometepec y otras ciudades aledañas del Estado de Guerrero* (Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información).
19. IINGEN-UNAM. (2017). Base de Datos de Registros Acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana (En línea), <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/Default.aspx> (último acceso el día 31 de julio del 2017).
20. Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering, Prentice-Hall.
21. Lazcano, S., (2001). Sismicidad histórica de Guadalajara, Jal. *Memorias del XIII Congreso Nacional de Ing. Sísmica*, Guadalajara, Jalisco.
22. Lazcano, S. (2012). Perfiles de Velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal.

*Memo XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.*

23. Lazcano, S., (2016). Cimentación de la Catedral de Guadalajara: enseñanzas y retos. *Memorias del XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, Mérida, Yucatán. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.
24. Lindh, A. G. (1983). Preliminary assessment of long-term probabilities for large earthquakes along selected fault segments of the San Andreas fault system in California, *U.S. Geol. Surv., Open-File Rept. 83-63*, 1-15
25. Martínez, M. (2011). *Estudio sísmico de la estructura cortical en el bloque de Jalisco a partir de registros locales del Proyecto Mars* (Doctoral dissertation, Tesis para optar el título de Magister en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México).
26. McGuire, R. K. (2004). *Seismic hazard and risk analysis*. Earthquake Engineering Research Institute.
27. Nishenko, S. P. (1985). Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal, *J. Geophys. Res.* 90, 3589-3615
28. Nishenko, S. P., & Buland, R. (1987). A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(4), 1382-1399.
29. Nishenko, S. P., & Singh, S. K. (1987). Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(6), 2095-2114.
30. Núñez Cornú, F. J., Reyes-Dávila G. A., Rutz-López., M., Trejo-Gómez, R., Camarena-García, A. and Ramírez-Vázquez, C. A. (2004). The 2003 Armería, Mexico Earthquake (Mw 7.4): Mainshock and early aftershocks. *Seismological Research Letters* 75:6, 506-605.
31. Núñez Cornú, F. J., (2011). Peligro Sísmico en el Bloque de Jalisco, México. *Física de la Tierra* Vol. 23 Núm. 1 (2011), páginas 199-299.
32. Ordaz, M., Pérez R. L. y Velázquez J., (2007). Definición de sismos máximos para el diseño sísmico de estructuras. *XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México.
33. Pérez, A., Ordaz M. y Yamin L. (2005). Método Alternativo para el cálculo de espectros de peligro uniforme considerando efectos de sitio (MADEES). *Memorias XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*.

34. RCDUMZ. (2003). Reglamento de Construcciones y Desarrollo Urbano del Municipio de Zapopan.
35. Rosenblueth, E., & Ordaz, M. (1987). Use of seismic data from similar regions. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 15(5), 619-634.
36. Rikitake, T. (1976). Recurrence of great earthquakes at subduction zones, *Tectonophysics* 35, 335-362.
37. Risk-Engineering. (2011). User's Manual Ez-Frisk v7.65, Risk Engineering, Inc., Golden, Colorado, USA.
38. ROMG. (1997). Reglamento Orgánico del Municipio de Guadalajara.
39. Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic analysis. Report No. EERC 70-10. *University of California, Berkeley*.
40. Shepard, D. (1968, January). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference* (pp. 517-524).
41. Singh, S., Ponce, L., and Nishenko, S. (1985). The Great Jalisco, Mexico earthquakes of 1932: subduction of the Rivera plate, *Bulletin of the Seismological Society of America* 75, 1301-1313.
42. SSN (2016). Servicio Sismológico Nacional (En línea), <http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/sismoMayor.pdf> (último acceso el día 31 de julio del 2017).
43. Sykes, L. R., & Nishenko, S. P. (1984). Probabilities of occurrence of large plate rupturing earthquakes for the San Andreas, San Jacinto, and Imperial faults, California, 1983–2003. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 5905-5927.
44. Wallace, R. E., Davis, J. F., & McNally, K. C. (1984). Terms for expressing earthquake potential, prediction, and probability. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(5), 1819-1825.
45. Youngs, R., Chiou, S.-J., Silva, W. and Humphrey, J. (1997). Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68:1, 58-73.
46. Zúñiga, R., Suárez, G., Ordaz, M., & García-Acosta, V. (1997). Peligro sísmico en latinoamérica y el Caribe. Capítulo dos: México: Reporte final. In *Peligro sísmico en latinoamérica y el Caribe. Capítulo dos: México: Reporte final*. Instituto Panamericano de Geografía e Historia.