



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

# **ESTIMACIÓN DE LA RESILIENCIA SÍSMICA EN SUELOS BLANDOS**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A**

ISMAEL IBÁÑEZ SÁNCHEZ

**DIRECTOR DE TESIS**

DR. JUAN MANUEL MAYORAL VILLA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017





*Solo existen dos días en el año en que no se puede hacer nada. Uno se llama ayer y otro mañana. Por lo tanto, hoy es el día ideal para amar, crecer, hacer y principalmente vivir.*

*Dalai Lama*

### **Dedicatoria**

Principalmente a mis padres, Margarita Sánchez Carmona y José Ibáñez Mejía por todo el apoyo brindado a lo largo de mi etapa como estudiante, nada de esto hubiera sido posible sin la aportación de su granito de arena día con día. Este logro también es de ustedes.

A mis hermanas Diana y Selene, mis sobrinos Abril y Rodrigo, y a mi cuñado Marco Antonio que son el complemento perfecto para seguir adelante y conseguir mis sueños.



## **Agradecimientos**

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, y en especial a la Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de tener una profesión.*

*Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, y en particular al Dr. Juan Manuel Mayoral Villa por darme la oportunidad y apoyo para la elaboración de mi tesis, ya que sin sus asesorías y conocimientos brindados no hubiera sido posible realizar este trabajo.*

*A cada uno de mis profesores de la universidad por su motivación y dedicación para formarme como ingeniero civil.*

*A mis compañeros que siempre están ahí para sacarme una carcajada a pesar de las circunstancias, asimismo por sus consejos y sabiduría aportada.*

*A Dios por permitirme cerrar un siglo de vida y abrir uno nuevo.*





<b>ÍNDICE .....</b>	<b>i</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>iii</b>
<b>OBJETIVO .....</b>	<b>iv</b>
<b>ALCANCES .....</b>	<b>iv</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>3</b>
1.1 <i>Sismicidad en México</i> .....	3
1.1.1 <i>Zonificación estratigráfica</i> .....	4
1.2 <i>Ondas sísmicas</i> .....	6
1.2.1 <i>Ondas primarias (P)</i> .....	6
1.2.2 <i>Ondas secundarias (S)</i> .....	7
1.2.3 <i>Ondas Rayleigh (R)</i> .....	8
1.2.4 <i>Ondas Love (L)</i> .....	8
1.3 <i>Descripción de un sismo</i> .....	9
1.4 <i>Propiedades dinámicas de los suelos</i> .....	10
1.4.1 <i>Determinación de las propiedades dinámicas</i> .....	12
1.5 <i>Riesgo sísmico</i> .....	14
1.6 <i>Derivación de las funciones de fragilidad</i> .....	15
1.6.1 <i>Tipología</i> .....	16
1.6.2 <i>Estados de daño y niveles de rendimiento</i> .....	16
1.6.3 <i>Medidas de intensidad</i> .....	17
1.7 <i>Resiliencia</i> .....	17
1.8 <i>Condiciones del suelo en la Ciudad de México</i> .....	19
<b>2 MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>21</b>
2.1 <i>Definición de la zona de estudio</i> .....	21
2.2 <i>Levantamiento de la infraestructura estratégica</i> .....	22
2.3 <i>Curvas de fragilidad</i> .....	22
2.3.1 <i>Descripción de los componentes de transporte</i> .....	23
2.3.2 <i>Definición de los estados de daño</i> .....	24
2.4 <i>Red simplificada</i> .....	26
2.5 <i>Cálculo de riesgo sísmico</i> .....	27
2.5.1 <i>Identificación de fuentes sísmicas</i> .....	27
2.5.2 <i>Modelos de recurrencia de sismos</i> .....	28
2.5.3 <i>Leyes de atenuación</i> .....	30
2.5.4 <i>Espectro de peligro uniforme</i> .....	31
2.6 <i>Estimación de la resiliencia sísmica</i> .....	33



<b>3</b>	<b>CASO DE ESTUDIO: ESTIMACIÓN DE LA RESILIENCIA SÍSMICA EN LA ZONA CENTRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO.....</b>	<b>35</b>
3.1	<i>Definición de la zona de estudio.....</i>	35
3.2	<i>Levantamiento de infraestructura estratégica.....</i>	36
3.3	<i>Curvas de fragilidad.....</i>	37
3.4	<i>Red simplificada.....</i>	38
3.5	<i>Condiciones geotécnicas del subsuelo.....</i>	39
3.6	<i>Cálculo de riesgo sísmico.....</i>	41
3.6.1	<i>Análisis de respuesta de sitio.....</i>	43
3.6.2	<i>Análisis de edificios colapsados.....</i>	50
3.6.3	<i>Red simplificada con los posibles bloqueos.....</i>	55
3.7	<i>Estimación de la resiliencia sísmica.....</i>	57
3.7.1	<i>Estimación de la resiliencia para vías urbanas.....</i>	57
3.7.2	<i>Estimación de la resiliencia para vías ferroviarias.....</i>	63
3.7.3	<i>Estimación de la resiliencia para pistas de aterrizaje.....</i>	64
3.7.4	<i>Estimación de la resiliencia para túneles.....</i>	65
3.7.5	<i>Estimación de la resiliencia para puentes.....</i>	66
3.8	<i>Curvas de fragilidad específicas para la Ciudad de México.....</i>	67
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>87</b>



## RESUMEN

Las ciudades densamente pobladas como la Ciudad de México, son ciudades integradas por complejos sistemas de servicios interconectados, que hacen frente a un creciente número de problemas que contribuyen al riesgo de catástrofes.

Uno de los principales factores de riesgo en el entorno urbano es el crecimiento exponencial de la población. La Ciudad de México es la más grande de América Latina en cuanto a número de habitantes. El aumento de la población provoca que los servicios se vuelvan insuficientes debido a la demanda existente, lo que conlleva a la creación de nueva infraestructura.

Se evaluó la resiliencia sísmica en las redes de transporte en una ciudad densamente poblada, ubicada en una región de gran actividad sísmica, mediante el método convencional para diferentes periodos de retorno. La estimación de los colapsos potenciales en edificios y componentes críticos de la red de transporte (túneles, pasos elevados, avenidas, líneas de metro, metrobús y pistas de aterrizaje del aeropuerto), se llevó a cabo utilizando las curvas de fragilidad apropiadas. Para la simulación de la red de transporte, se propusieron modelos sencillos de bloqueo / colapso de edificios, ya que de esta manera se toma en cuenta la posibilidad de que los escombros procedentes del colapso de algún edificio puedan bloquear algunas avenidas. El análisis de la red de transporte se desarrolló tomando en cuenta sólo la función de rescate inmediatamente después del sismo, para definir los sectores críticos de la red con respecto a la pérdida de su conectividad. Por último, se realizó la estimación de la resiliencia sísmica considerando los posibles daños que presentó la red simplificada.



## OBJETIVO

Estimar la resiliencia sísmica en la zona centro de la Ciudad de México para cuatro periodos de retorno distintos, para un sismo normal y para un sismo de subducción, consecuentemente definir los sectores críticos de la red simplificada, de acuerdo a los daños que presente cada componente de la infraestructura estratégica.

## ALCANCES

Se presenta la estimación de la resiliencia sísmica mediante el método convencional. Con dos espectros de peligro uniformes (EPU), uno para sismo normal y otro para sismo de subducción, se hace el análisis probabilista para obtener los espectros de respuesta con el programa computacional RADSH. Se obtienen aceleraciones máximas del suelo (PGA), las cuales se relacionan con las curvas de fragilidad para calcular la probabilidad de falla de cada componente de la infraestructura estratégica. Se definen los sectores críticos de la red simplificada y se procede a calcular la resiliencia sísmica.





## INTRODUCCIÓN

La estimación de la resiliencia sísmica en infraestructura estratégica de ciudades densamente pobladas, ubicadas en regiones de gran actividad sísmica, es un paso obligatorio para implementar programas de contingencia después de un sismo de gran magnitud, así como asignar de manera eficiente los recursos y el personal que participen en las acciones posteriores al sismo. La resiliencia se puede definir como la capacidad de mantener un nivel de funcionalidad en edificios, puentes o redes de servicios indispensables, durante un periodo definido. A este periodo se le denomina normalmente como el ciclo de vida o la vida útil del sistema (Cimellaro, 2013). En términos más simples la resiliencia es la capacidad de un sistema para operar en una situación de crisis extrema y posteriormente recuperarse.

Para definir las dimensiones de la resiliencia se deben considerar las 4R por sus siglas en inglés (Robustness, Redundancy, Resourcefulness y Rapidity). 1) Robustez, es la fuerza o la capacidad de los elementos, sistemas, y otras unidades de análisis para soportar un determinado nivel de esfuerzos, sin sufrir degradación o pérdida de la función, 2) Redundancia, es el grado en el que los elementos, sistemas u otras unidades de análisis que existen son sustituibles, 3) Estrategia, se puede conceptualizar como la habilidad de asignar materiales (monetarios, físicos, tecnológicos, de información) y recursos humanos para cumplir con las prioridades establecidas, y 4) Rapidez, que es la capacidad para cumplir con las prioridades y alcanzar objetivos de manera oportuna a fin de contener las pérdidas y evitar futuras interrupciones (Bruneau *et al.*, 2003). La estrategia y la redundancia están estrechamente vinculados, dado que la estrategia puede crear redundancia que antes no existía.

A partir de los últimos eventos sísmicos extremos, tales como: Christchurch en Nueva Zelanda, 2009; L'Aquila en Italia, 2011; Ometepec Guerrero en México, 2012; Tohoku en Japón, 2011, la comunidad internacional ha tomado conciencia de que la resiliencia es la clave para describir el desempeño de la ingeniería sísmica (Bruneau *et al.*, 2003).



Esta tesis presenta la estimación de la resiliencia sísmica en redes de transporte de una zona densamente poblada, como lo es el centro de la Ciudad de México, donde se presentan suelos blandos. Se utilizó el método convencional para evaluar los efectos que provocarían un sismo normal y un sismo de subducción con diferentes periodos de retorno ( $T_r$ ), expresada en términos de aceleraciones máximas del suelo (PGA), desplazamientos máximos del suelo (PGD) o velocidades máximas del suelo (PGV). La estimación de los colapsos potenciales en edificios y componentes críticos de la red de transporte (túneles, pasos elevados, avenidas, líneas de metro, metrobús y pistas de aterrizaje del aeropuerto), se llevó a cabo utilizando las curvas de fragilidad apropiadas. Para la simulación de la red de transporte, se propusieron modelos sencillos de bloqueo / colapso de edificios, propuestos por Argyroudis *et al.*, (2015), para tomar en cuenta la posibilidad de que los escombros procedentes del colapso de algún edificio puedan bloquear algunas avenidas. El análisis de la red de transporte se desarrolló tomando en cuenta sólo la función de rescate inmediatamente después del sismo, para definir los sectores críticos de la red con respecto a la continuidad o pérdida de su conectividad. Por último, se realizó la estimación de la resiliencia sísmica considerando los posibles daños que presentó la red simplificada.

# 1 ANTECEDENTES

## 1.1 Sismicidad en México

Los terremotos pueden considerarse como uno de los peligros naturales más mortales en el planeta. Literalmente, en pocos segundos miles de vidas pueden perderse debido a su considerable fuerza de destrucción. México es considerado como una de las regiones sísmicamente más activas de la tierra. El país está situado encima de las grandes placas tectónicas que constituyen la superficie terrestre y el movimiento de estas placas provocan terremotos y actividad volcánica (Santos *et al.*, 2014).

El territorio mexicano se encuentra dividido entre cinco placas tectónicas (Figura 1.1), las cuales son:

1. La placa Norteamericana, sobre la cual se encuentra la mayor parte del país
2. La del Pacífico, en donde se encuentra la península de Baja California
3. La placa del Caribe, en la donde se encuentra el sur de Chiapas
4. Las placas de Cocos y Rivera, estas son oceánicas y se encuentran bajo el Océano.

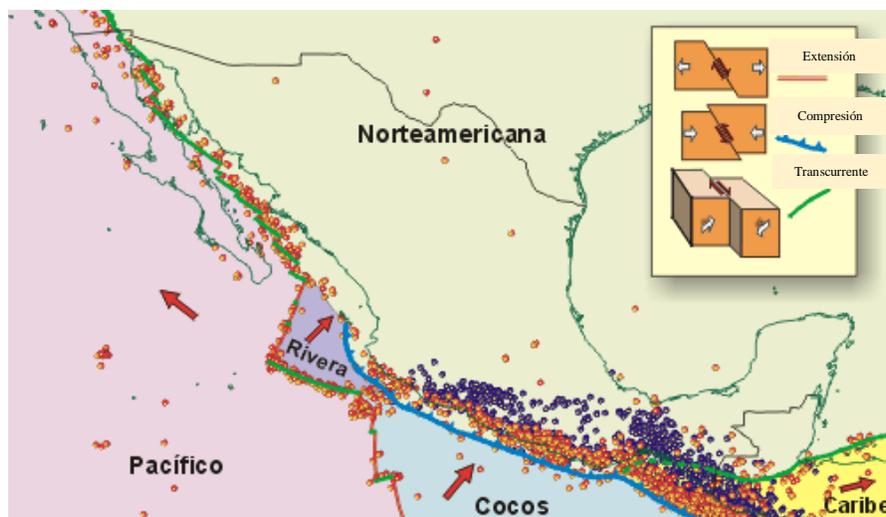


Figura 1.1. Placas tectónicas de la República Mexicana y tipos de fallas (Kostoglodov y Pacheco, 1999)



De acuerdo con el catálogo de historia sísmica del país del siglo XX, en promedio ocurren 5 sismos de magnitud mayor o igual que 6.5 (Ms) cada 4 años. Sismos con mayor frecuencia, por ejemplo, cada año, se registran más de 100 con magnitudes mayores o iguales que 4.5 (Ms), mientras que se espera un sismo con magnitud mayor o igual que 7.5 (Ms) cada 10 años (Kostoglodov y Pacheco, 1999).

La longitud de ruptura de los grandes sismos de subducción que han ocurrido durante este siglo en México varía de unos 50 kilómetros hasta 200 kilómetros de largo. Estos temblores ocurren por el roce entre la placa Norteamericana y las placas oceánicas de Cocos y Rivera, a lo largo de su zona de contacto. El sismo del 19 de septiembre de 1985 reportó una magnitud de 8.1 en la escala de Richter y una ruptura que cubrió casi toda la costa del estado de Michoacán (longitud de 180 km). Estos sismos de subducción son sismos someros, se concentran entre los 5 y los 35 kilómetros de profundidad.

El tamaño de un sismo es una función del área de ruptura. Entre mayor sea el área de ruptura por la acción de las fuerzas tectónicas, mayor es el tamaño del sismo. Como la mayor área de contacto entre placas se encuentra en las zonas de subducción, es aquí donde ocurren los sismos más grandes, no sólo en México, sino también en el Mundo (Kostoglodov y Pacheco, 1999).

### 1.1.1 Zonificación estratigráfica

La zonificación de la Ciudad de México ha dado lugar a una subdivisión en tres zonas, como se indica en la Figura 1.2, que de acuerdo con el actual Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF-2004) son las siguientes:

- a) Zona I. Lomas, formada por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos no controlados.

b) Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limos arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de estas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.

c) Zona III. Lacustre, integrada por depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente compactas a muy compactas y de espesor variable.

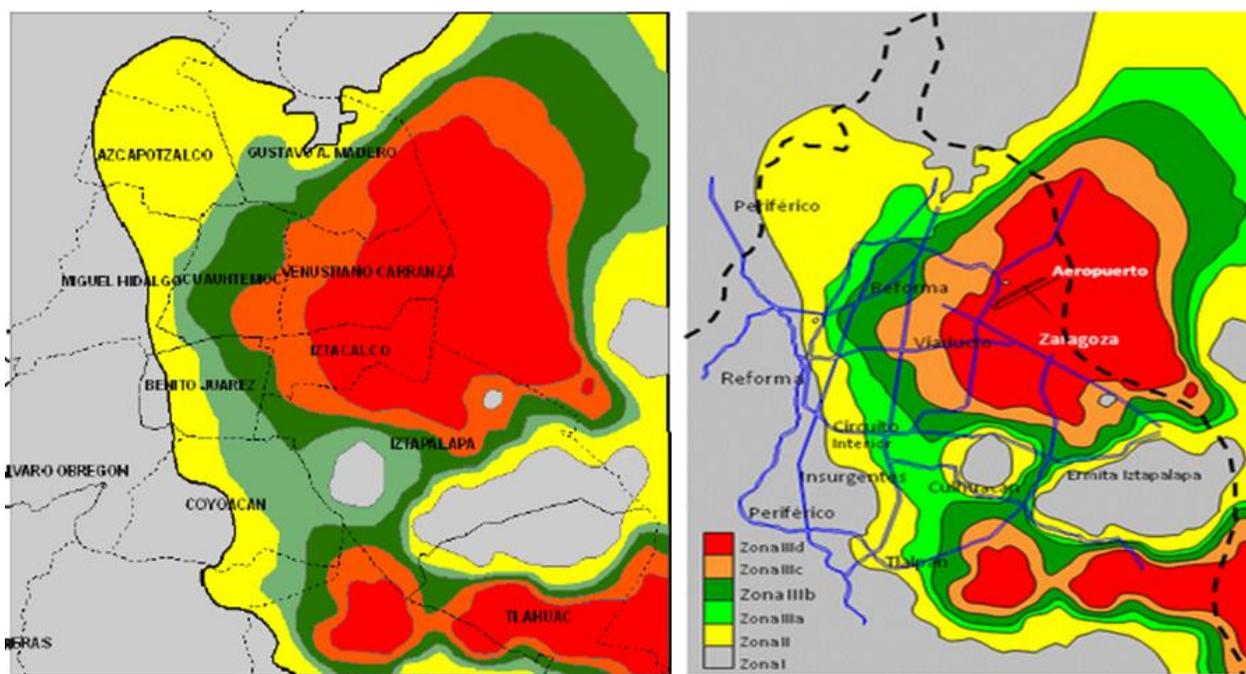


Figura 1.2 Zonificación estratigráfica de la Ciudad de México de acuerdo al RCDF-2004



## 1.2 Ondas sísmicas

Cuando ocurre un terremoto, diferentes tipos de ondas sísmicas se producen: ondas de cuerpo y ondas de superficie. Las ondas de cuerpo pueden viajar a través del interior de la tierra, son divididas en dos grupos: ondas primarias (P) y ondas secundarias (S). Las ondas superficiales más importantes son las ondas Rayleigh (R) y las ondas Love (L), estas resultan de la interacción entre las ondas de cuerpo y las capas superficiales de la tierra. Ellas viajan a lo largo de la superficie de la tierra con amplitudes que decrecen exponencialmente con la profundidad. Debido a la naturaleza de las interacciones necesarias para producirlas, las ondas de superficie son más prominentes a distancias más alejadas de la fuente del terremoto (Kramer, 1996).

### 1.2.1 Ondas primarias (P)

Las ondas primarias, P, también conocidas como ondas de compresión o longitudinales, ocasionan compresiones y rarefacciones a los materiales a través de los cuales pasan. Son análogas a las ondas sonoras. El movimiento de una partícula a través de la cual viaja una onda P es paralelo a la dirección de desplazamiento. Al igual que las ondas sonoras, las ondas P pueden viajar a través de sólidos y fluidos (Kramer, 1996). En la Figura 1.3 se muestra esquemáticamente las deformaciones producidas por una onda P.

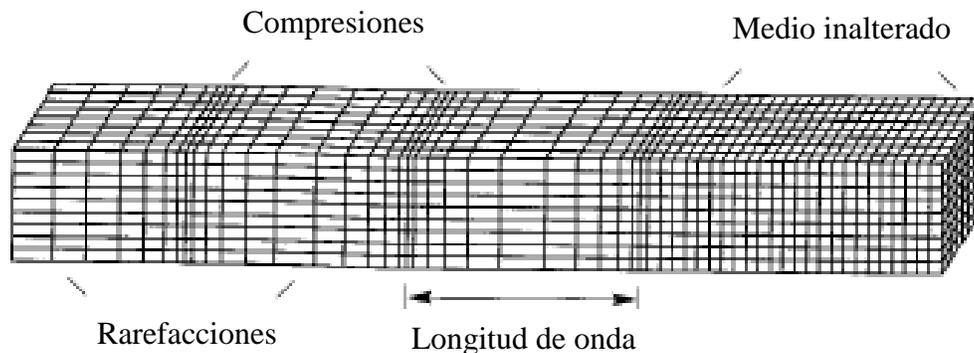
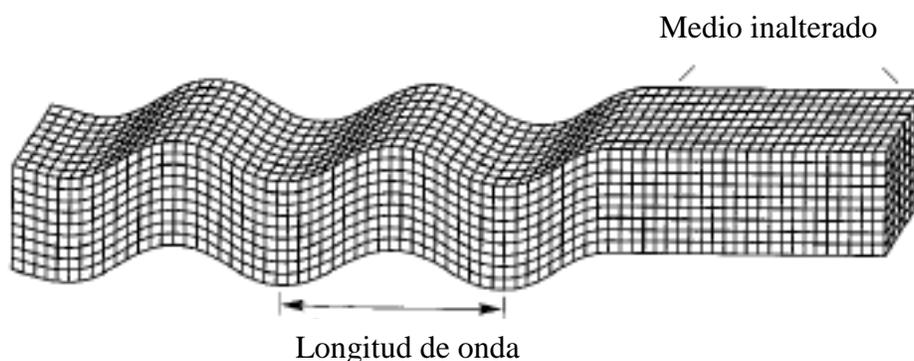


Figura 1.3 Deformaciones producidas por una onda P (Kramer, 1996)



### 1.2.2 Ondas secundarias (S)

Las ondas secundarias, S, también conocidas como ondas cortantes o transversales, causan deformaciones por corte a medida que viajan a través de un material. El movimiento de una partícula individual es perpendicular a la dirección de la trayectoria de la onda S. La dirección de movimiento de las partículas se puede utilizar para dividir las ondas S en dos componentes: SV (movimiento del plano vertical) y SH (movimiento del plano horizontal) (Kramer, 1996). En la Figura 1.4 se muestra esquemáticamente las deformaciones producidas por una onda SV.

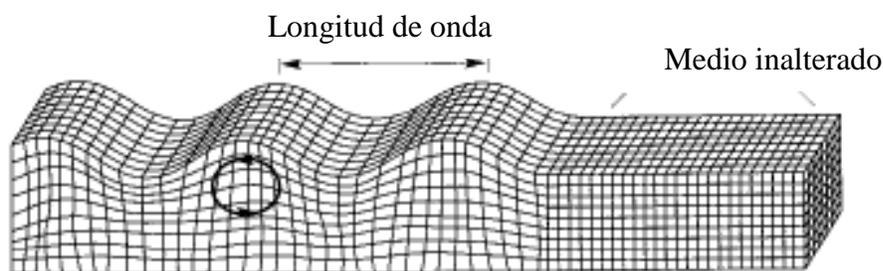


*Figura 1.4 Deformaciones producidas por una onda SV (Kramer, 1996)*

La velocidad a la que viajan las ondas de cuerpo varía de acuerdo con la rigidez de los materiales por los que viajan. Las ondas P viajan más rápido que otras ondas sísmicas y por lo tanto son las primeras en llegar a un sitio en particular (Kramer, 1996).

### 1.2.3 Ondas Rayleigh (R)

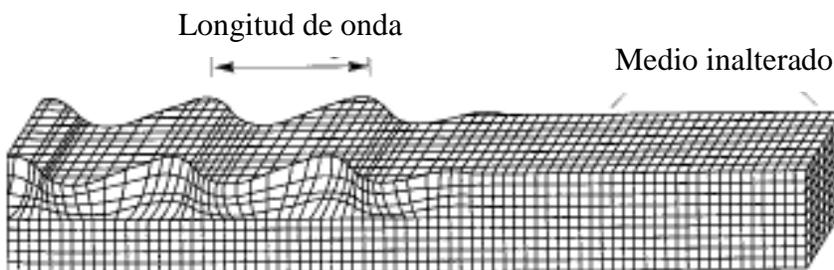
Las ondas Rayleigh, R, son ondas producidas por la interacción de las ondas P y las ondas SV con la superficie terrestre, implican movimientos verticales y horizontales de las partículas. Como ejemplo, estas olas son similares a las olas producidas por una roca arrojada en un estanque (Kramer, 1996). En la Figura 1.5 se muestra esquemáticamente las deformaciones producidas por una onda R.



*Figura 1.5 Deformaciones producidas por una onda R (Kramer, 1996)*

### 1.2.4 Ondas Love (L)

Las ondas Love, L, son otro tipo de ondas superficiales, resultan de la interacción de las ondas SH con una capa superficial, asimismo, no tienen componente vertical del movimiento de la partícula (Kramer, 1996). En la Figura 1.6 se muestra esquemáticamente las deformaciones producidas por una onda L.



*Figura 1.6 Deformaciones producidas por una onda L (Kramer, 1996)*



### 1.3 Descripción de un sismo

Los terremotos resultan de la ruptura de la roca a lo largo de una falla, y aunque la ruptura puede involucrar miles de kilómetros cuadrados de superficie, esta debe comenzar en alguna parte. El punto en el que comienza la ruptura y en el cual se originan las primeras ondas sísmicas se llama foco, o hipocentro del terremoto (Figura 1.7). Desde el foco, la ruptura se extiende a través de la falla a velocidades de 2 a 3 km/s (Bolt, 1989). Aunque la ruptura de falla puede extenderse a la superficie del suelo, el foco se ubica en alguna profundidad focal o profundidad hipocentral debajo de la superficie del suelo. El punto en la superficie del suelo directamente encima del foco se llama el epicentro. La distancia en la superficie del suelo entre un observador o sitio y el epicentro se conoce como la distancia epicentral, y la distancia entre el observador y el foco se llama distancia focal o distancia hipocentral (Kramer, 1996).

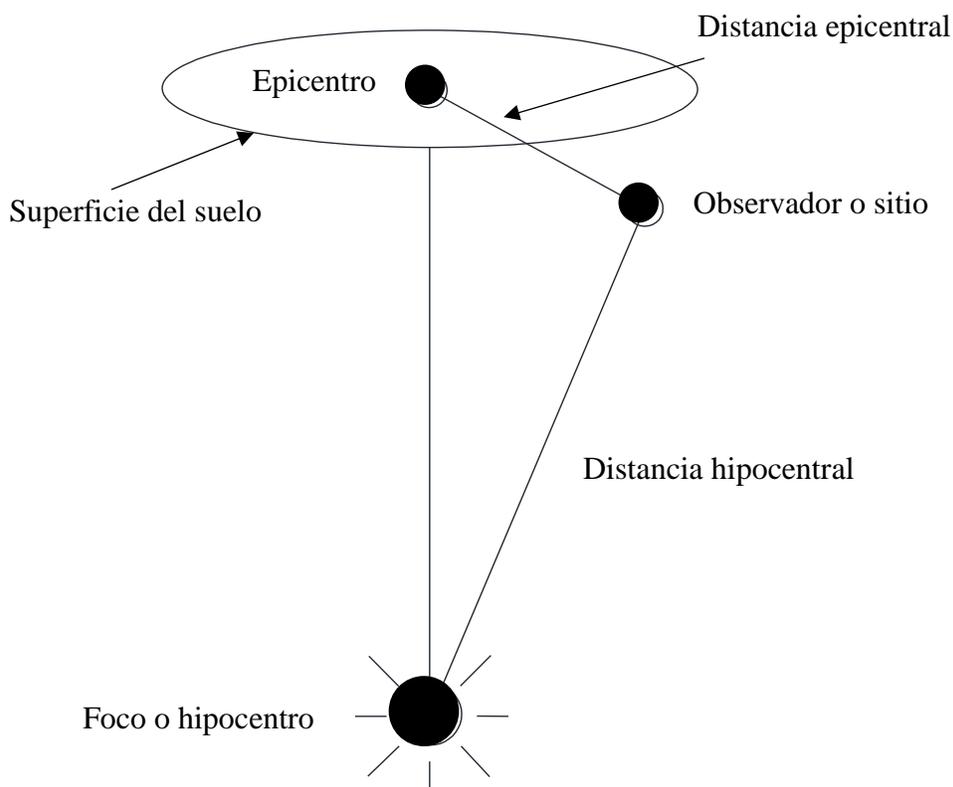


Figura 1.7 Descripción de la ubicación de un terremoto (Kramer, 1996)



## 1.4 Propiedades dinámicas de los suelos

Uno de los principales problemas a resolver en la ingeniería sísmica es la caracterización del ambiente sísmico a utilizar en el análisis y diseño de estructuras. Se ha observado que esto es influenciado por factores como la magnitud del sismo, la distancia desde el sitio de origen de la liberación de energía, las características geológicas a lo largo del trayecto de transmisión de la onda desde el origen al sitio, el mecanismo de origen del sismo, los efectos de interferencia de onda relacionados con la dirección y la velocidad de ruptura de la falla y las condiciones locales del subsuelo (Seed *et al.*, 1983). Para realizar el análisis de una estructura durante un sismo es necesario hacer la caracterización del subsuelo, por consiguiente, se deben tomar en cuenta las propiedades que más influyen en la propagación de onda (rigidez y amortiguamiento), debido a que los suelos tienen un comportamiento no lineal asociados a la deformación angular generados durante un sismo. A deformaciones pequeñas ( $\gamma = 10^{-4} \%$ ) la respuesta de los suelos arcillosos es lineal por lo que se estima que el amortiguamiento es pequeño y el módulo de rigidez permanece constante, a este valor del módulo de rigidez se le conoce como módulo de rigidez al esfuerzo cortante máximo,  $G_{max}$ , aunque teóricamente no existe disipación de energía cuando el suelo tiene un comportamiento lineal, se ha comprobado experimentalmente que incluso a niveles muy bajos de deformación algo de energía es disipada, por lo que la relación de amortiguamiento nunca es cero y mantiene un valor constante. A deformaciones ( $\gamma > 10^{-2} \%$ ) el suelo comienza a disipar más energía por histéresis y el módulo de rigidez disminuye (Seed *et al.*, 1983).

Las Figuras 1.8 y 1.9 presentan un ejemplo del comportamiento general de las curvas características de la variación de las propiedades dinámicas con respecto a la deformación angular.

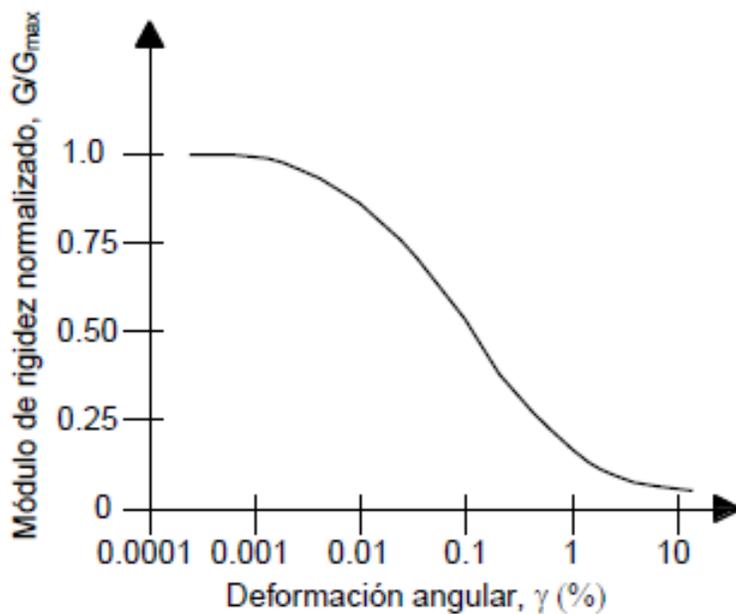


Figura 1.8 Curva de degradación del módulo de rigidez con respecto a  $G_{max}$

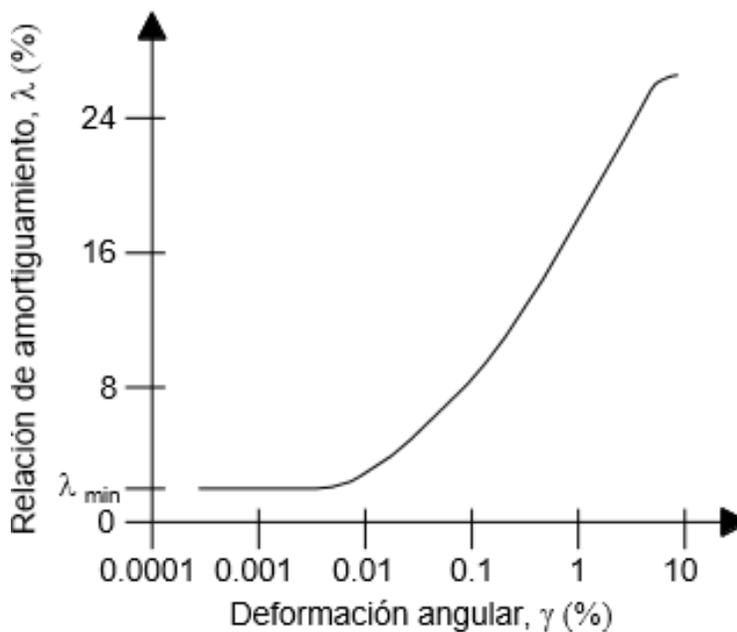


Figura 1.9 Curva de incremento de la relación de amortiguamiento



### 1.4.1 Determinación de las propiedades dinámicas

Algunas propiedades de los suelos pueden ser obtenidas mediante pruebas de campo en tanto que otras necesitan de la realización de pruebas de laboratorio, por ejemplo, las velocidades de propagación de onda,  $V_p$  y  $V_s$ , son medidas o estimadas mediante pruebas de campo, en cambio la degradación del módulo de rigidez y el incremento de la relación de amortiguamiento solo pueden ser estimadas mediante pruebas dinámicas de laboratorio (Osorio, 2007).

La mayoría de las pruebas de campo (dinámicas) están dirigidas a obtener la velocidad de propagación de onda a cortante  $V_s$ , mediante la inducción de deformaciones, las principales pruebas de campo son:

- Refracción sísmica
- Sonda suspendida
- Cross-hole
- Down-hole y Up-hole

Debido a que algunas de las pruebas dinámicas de campo son difíciles de realizar o bien tienen un costo considerable, se ha buscado relacionar con parámetros conocidos o fáciles de obtener, mediante correlaciones empíricas. Seed e Idriss en 1981 propusieron estimar la velocidad de onda de corte en cualquier tipo de suelo, mediante la siguiente ecuación:

$$V_s = \alpha N^\beta \quad \text{ec.1.1}$$

Donde:

$V_s$  = velocidad de propagación de la onda de cortante, m/s

$N$  = número de golpes de la prueba de penetración estándar corregido por energía y sobrecarga

$\alpha, \beta$  = coeficientes que se determinan por medio de la regresión estadística de un conjunto de datos.



Es importante resaltar que esta ecuación permite obtener una buena estimación para arenas, pero no así para las arcillas de la ciudad de México. La velocidad de onda de cortante para arcillas y limos se puede estimar usando la ecuación propuesta por Ovando y Romo (1990) en términos de la resistencia de punta a la penetración,  $q_c$ , medida con la prueba de cono eléctrico, CPT, dicha ecuación es la siguiente:

$$V_s = \eta \sqrt{\frac{q_c}{N_{kh}\gamma_s}} \quad \text{ec.1.2}$$

Donde:

$V_s$  = velocidad de propagación de la onda de cortante, m/s

$q_c$  = resistencia de punta obtenida de una prueba de cono eléctrico (CPT)

$\eta, N_{kh}$  = coeficientes que dependen del tipo de suelo

$\gamma_s$  = peso volumétrico del suelo, ton/m<sup>3</sup>

Obtenidas las velocidades de onda de corte y aplicando la teoría de la elasticidad es posible conocer el valor del módulo de rigidez,  $G$ , utilizando la siguiente ecuación:

$$G = V_s^2 * \rho \quad \text{ec.1.3}$$

Donde:

$G$  = módulo de rigidez, kg/cm<sup>2</sup>

$V_s$  = velocidad de propagación de la onda cortante, m/s

$\rho$  = densidad del suelo, kg/m<sup>3</sup>

La ec.1.3 se puede utilizar para obtener el valor del módulo de rigidez a cualquier deformación, ya sea en el rango lineal o en el rango no lineal. Ya que la mayoría de las pruebas geo sísmicas inducen al suelo a deformaciones menores que 10-5 %.



## 1.5 Riesgo sísmico

La evaluación del riesgo sísmico se define como la estimación de la probabilidad de daños y pérdidas debido a eventos sísmicos. La mayoría de los enfoques disponibles para evaluar las pérdidas potenciales de un amplio grupo de elementos dependen de la disponibilidad de curvas de fragilidad representativas (Pitilakis *et al.*, 2014).

Hay una serie de definiciones de vulnerabilidad y funciones de fragilidad; unas de estas describen las funciones de vulnerabilidad como la probabilidad de pérdidas (tales como pérdidas económicas) dado un nivel de movimiento del suelo, mientras que las funciones de fragilidad proporcionan la probabilidad de excedencia para diferentes estados de daño (tales como daños físicos) dado un nivel de movimiento del suelo (Pitilakis *et al.*, 2014).

Las curvas de fragilidad constituyen uno de los elementos clave para la evaluación del riesgo sísmico, relacionan una medida de intensidad sísmica con la probabilidad de alcanzar o superar un nivel de daño (menor, moderado, extenso, completo o colapso) para los elementos en riesgo. Las Figuras 1.10 y 1.11 muestran ejemplos de vulnerabilidad y función de fragilidad respectivamente.

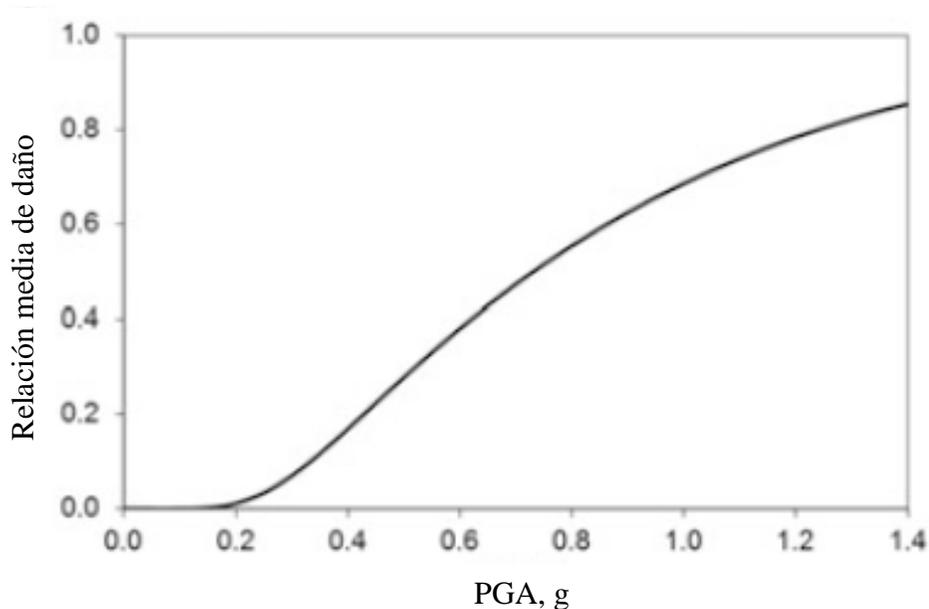


Figura 1.10 Función de vulnerabilidad (Pitilakis *et al.*, 2014)

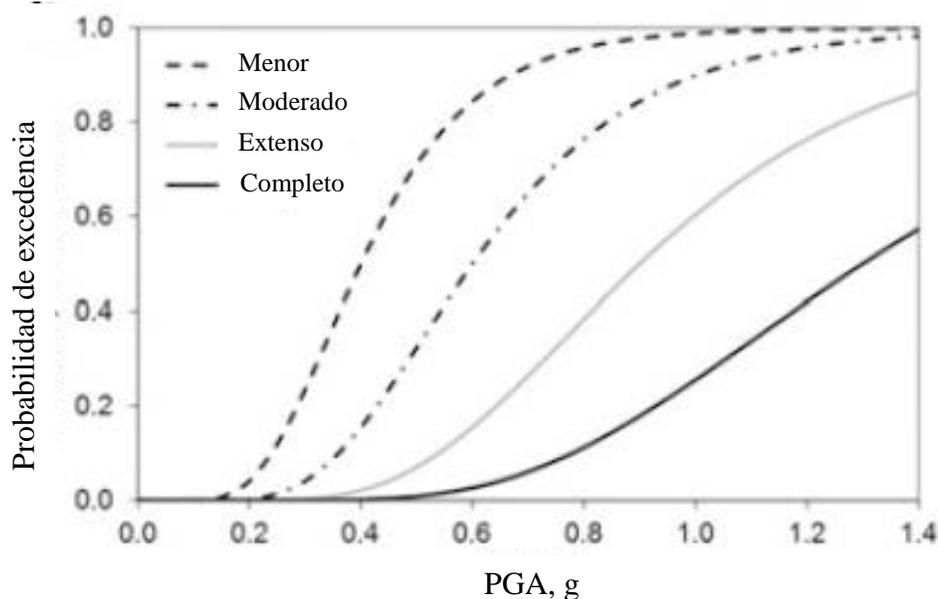


Figura 1.11 Función de fragilidad (Pitilakis et al., 2014)

## 1.6 Derivación de las funciones de fragilidad

Existen varios métodos disponibles y usados en la literatura para obtener funciones de fragilidad para diferentes elementos expuestos a riesgos sísmicos (Pitilakis *et al.*, 2014), para la generación de funciones de fragilidad se deben tomar en cuenta tres parámetros importantes que se mencionan a continuación y son descritas posteriormente.

- Tipología
- Estados de daño y niveles de rendimiento
- Medidas de intensidad



### 1.6.1 Tipología

La tipología es un descriptor fundamental de un sistema que se deriva a partir de las características de cada elemento. La geometría, propiedades del material, nivel de diseño sísmico y las condiciones del suelo están usualmente entre los descriptores. Por ejemplo, un edificio de concreto reforzado, un edificio de acero, un edificio de mampostería, un monumento, un puente, un túnel, un terraplén, una red de carreteras, una red de ferrocarriles, etc., tienen su propio conjunto de tipologías diferentes. Por lo tanto, la derivación de curvas de fragilidad apropiadas para cualquier tipo de estructura depende totalmente de la creación de una tipología razonable que sea capaz de clasificar diferentes tipos de infraestructura en cualquier sistema expuesto a un peligro sísmico (Pitilakis *et al.*, 2014).

### 1.6.2 Estados de daño y niveles de rendimiento

En la evaluación del riesgo sísmico, los niveles de rendimiento de una estructura se pueden definir a través de umbrales de daños, llamados estados límite. Un estado límite define el límite entre dos daños diferentes denominados estados de daño. Diferentes criterios de daño han sido propuestos en función de las tipologías de los elementos en riesgo y el enfoque utilizado para la derivación de las curvas de fragilidad. La forma más común de clasificar los estados de daño de un sismo son daño menor, daño moderado, daño extenso y daño completo o colapso como se pudo mostrar en la Figura 1.11. Este enfoque requiere un acuerdo sobre el significado de cada estado de daño.

En particular los daños físicos están relacionados con el nivel de servicio esperado del sistema, si el sistema está totalmente o parcialmente operativo o en su caso inoperante, es decir, cuál es su funcionalidad correspondiente. Los métodos para la generación de las curvas de fragilidad generalmente modelan el daño en una escala discreta de daño y es bastante subjetiva (Pitilakis *et al.*, 2014).



### 1.6.3 Medidas de intensidad

Uno de los puntos importantes relacionado con las curvas de fragilidad es la selección de una medida de intensidad del sismo, IM, que caracteriza el movimiento del suelo y se relaciona con la respuesta de cada elemento.

En general, la incertidumbre de los parámetros para la derivación de las funciones de fragilidad considera tres fuentes principales de incertidumbre (la definición de los estados de daño, la capacidad del elemento acontecido el sismo y el movimiento de entrada del sismo). La incertidumbre de la definición de los estados de daño se debe al hecho de que los índices de daño no se conocen como tal, es decir, se definen de una manera subjetiva. En cuanto a la capacidad del elemento acontecido el sismo, la incertidumbre se refleja en la variabilidad de las propiedades de la estructura. Mientras que la incertidumbre en el movimiento de entrada del sismo se refleja en las medidas de intensidad, por los diferentes registros de movimiento del suelo, es decir, con IM iguales se pueden tener diferentes efectos sobre la misma estructura (Selva *et al.*, 2013).

## 1.7 Resiliencia

Los conceptos de "reducción del riesgo", "vulnerabilidad", "recuperación" y "resiliencia" se han convertido en palabras clave cuando se trata de eventos peligrosos, pero hay una necesidad de ir más allá de la definición intuitiva y proporcionar una evaluación cuantitativa de ellos. Cuando ocurre un desastre, la comunidad afectada requiere ayuda inmediata para sobrevivir, los recursos y los esfuerzos para recuperar en un corto período de tiempo. En otras palabras, la comunidad tiene que estar "preparada" y ser menos "vulnerable", con el fin de lograr una mayor "resiliencia" (Cimellaro *et al.*, 2010).



Un ejemplo de una comunidad afectada y que actualmente es una ciudad más resiliente es la ciudad de Kobe, Japón, cuya población es de 1.5 millones de habitantes, sufrió grandes pérdidas durante el gran terremoto de Hanshin-Awaji en enero de 1995 de magnitud 7.2 en la escala de Richter (Figura 1.12), con lo cual se interrumpieron las actividades de uno de los puertos más transitados de la región. El proceso de recuperación se centró en la creación de una ciudad más segura, donde la infraestructura y los sistemas complejos de servicios se equilibran con la interacción humana, la educación y la cooperación comunitaria (ONU, 2012).



*Figura 1.12 Daños a la infraestructura ocasionados por el terremoto de Kobe en 1995*

La resiliencia puede ser considerada como una cantidad dinámica que cambia con el tiempo y el espacio. El primer paso para cuantificar la resiliencia es definir la escala espacial (por ejemplo, construcción, estructura, comunidad, ciudad, región) del problema de interés. Es importante mencionar que todo el proceso de recuperación se ve afectada por la escala espacial de la catástrofe. Desastres enormes necesitarán un proceso de recuperación más largo. La escala espacial también será utilizada para definir las medidas de desempeño para la funcionalidad global del sistema. El segundo paso es definir la escala temporal (respuesta de emergencia a corto plazo, fase de reconstrucción a medio plazo, fase de reconstrucción a largo plazo, etc.) del problema de interés (Cimellaro, 2013).



## 1.8 Condiciones del suelo en la Ciudad de México

Las condiciones del suelo en la Ciudad de México han sido objeto de muchas investigaciones en los últimos 40 años, después del devastador terremoto de Michoacán de 1985. Debido a las características particulares de la arcilla de la Ciudad de México que tiene un índice de plasticidad alto, no se observa una reducción significativa en el módulo de rigidez, incluso para deformaciones angulares de hasta 0.1%. Del mismo modo, no hay un aumento significativo en la relación de amortiguamiento hasta que se alcanzan distorsiones angulares del orden de 0.3% (Mayoral *et al.*, 2007).

Usualmente se ha considerado que las arcillas de alta plasticidad (i.e. aquellas con índice de plasticidad mayor a 250%), tal como las que se encuentran en el Valle de la Ciudad de México, exhiben una pequeña cantidad de comportamiento no lineal durante eventos sísmicos extremos, tal como el observado durante terremoto de Michoacán de 8.1 Mw, incluso para deformaciones angulares del orden de 0.1% (Bard 1988, Singh y Ordaz 1993, Ordaz y Faccioli 1994).

La mayor parte de la Ciudad de México se encuentra en lo que solía ser un lago. La desecación del lago, fue principalmente mediante la desviación de ríos que afluyen y por la recuperación de tierras, esto provocó un proceso de consolidación regional a mediados del siglo XIX cuando el agua comenzó a ser bombeada de los acuíferos que subyacen en los suelos arcillosos, debido al aumento de la población. De 1900 a 1920, la tasa de hundimiento en el centro de la Ciudad de México fue de 3 cm/año; por la década de 1940 la tasa fue de 13 cm/año y en la década de 1950 llegó a 26 cm/año. Los pozos en el centro de la Ciudad de México fueron prohibidos en la década de 1960 y la tasa de hundimiento se redujo a 5 cm/año. A finales de 1970 y principios de 1980 nuevos pozos se pusieron en funcionamiento, sobre todo cerca de las colinas que rodean la ciudad en el norte y el sur. Las tasas de hundimiento aumentaron de nuevo y en el centro de la Ciudad de México, ahora ascienden de 7 a 10 cm/año. Pero en algunos sitios cerca de los pozos nuevos superan los 30cm/año.



El hundimiento total sobre los últimos 100 años, con respecto a un punto de referencia fuera de la zona del lago es ahora más de 8 m en algunas zonas. El agua bombeada de los acuíferos proporciona alrededor de dos tercios de suministro de la ciudad y es muy poco probable que el bombeo se detenga o incluso se reduzca en el futuro, teniendo en cuenta las tendencias de expansión urbana observadas en las últimas décadas (Romo *et al.*, 2007)

Actualmente, los criterios de diseño sísmico utilizados en todo el mundo, se han esforzado por tener periodos de retorno más grandes para caracterizar el ambiente sísmico cuando se trata de infraestructura estratégica, esta caracterización se realiza dentro de un marco de análisis de riesgo sísmico probabilista, PSHA. Sin embargo, cuando se realiza un análisis de respuesta de sitio con grandes periodos de retorno, la demanda sísmica puede incrementar de manera poco realista si no se toma en cuenta la no linealidad del suelo, esto debido al desconocimiento de la magnitud de la aceleración espectral y del contenido de frecuencias, lo cual conduce a diseños sísmicos costosos e incluso algunas veces peligrosos. En el pasado varios autores han establecido la importancia de tomar en cuenta los efectos no lineales tanto en la atenuación de los movimientos telúricos como en la modificación del contenido de frecuencias, para arcillas de baja plasticidad y arenas (Lee *et al.*, 2006, Yee *et al.*, 2013). Sin embargo, este sigue siendo un tema controvertido entre los sismólogos y los ingenieros geotécnicos cuando se trata de eventos sísmicos extremos en depósitos de arcilla de alta plasticidad, donde el efecto del índice de plasticidad, que es uno de los parámetros más importantes para definir la degradación del suelo durante una carga sísmica (Vucetic, 1992), es comúnmente ignorado.



## 2 MARCO METODOLÓGICO

En esta tesis se realizó la estimación de la resiliencia sísmica en redes de transporte, mediante el método convencional, en una zona densamente poblada, como lo es el centro de la Ciudad de México, donde se presentan suelos blandos.

El método convencional consiste en los siguientes pasos:

- Definir una zona de estudio
- Hacer el levantamiento de la infraestructura estratégica o crítica
- Definir apropiadamente las curvas de fragilidad para cada elemento
- Realizar el planteamiento de la red simplificada
- Calcular el riesgo sísmico
- Estimar la resiliencia sísmica considerando los posibles daños que presente la red simplificada.

### 2.1 Definición de la zona de estudio

Con la definición de la zona de estudio se pretende que sea una zona representativa, es decir, una zona que presente antecedentes de terremotos acontecidos o que sea una zona altamente sísmica y densamente poblada donde haya gran número de infraestructura estratégica o crítica, para que la estimación de la resiliencia sísmica sea significativa y se pueda generar un plan de contingencia a futuro para dicha zona.

Como se mencionó anteriormente la zona de estudio puede ser tan grande como queramos, la zona puede ser desde una comunidad hasta una región o ciudad, dependiendo de nuestro caso de estudio.



## 2.2 Levantamiento de la infraestructura estratégica

La infraestructura estratégica se compone de toda aquella infraestructura que ofrece algún tipo de servicio como la red de transporte, donde se encuentra el Sistema de Transporte Colectivo Metro, el Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros, mejor conocido como Metrobús (BRT), el Tren ligero de la Ciudad de México, el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, avenidas principales y secundarias, túneles, puentes vehiculares y pasos a desnivel, , así como infraestructura primordial o infraestructura que pueda colapsarse, como edificios gubernamentales, escuelas, hoteles, plazas comerciales, viviendas, hospitales, estadios, entre otros.

## 2.3 Curvas de fragilidad

Una curva de fragilidad es una función matemática que expresa la probabilidad de que ocurra algún acontecimiento indeseable; normalmente que un componente alcance o supere un cierto estado de límite, provocado por un sismo, huracán, inundación, tsunami u otro evento extremo. El procedimiento general para la derivación de curvas de fragilidad se describió anteriormente, el cual consiste en conocer primeramente los parámetros que describen la tipología. Una vez conocida la tipología se procede a definir un parámetro sísmico, el cual se relaciona con una medida de intensidad del movimiento sísmico (PGA, PGV o PGD). Por último, se asigna un índice de daño, que relaciona el parámetro sísmico con el daño que pueda tener el componente a evaluar, llámese terraplén, lumbrera, edificio, túnel, vías urbanas, vías férreas, puente, entre otros (Mayoral *et al.*, 2015)

De las curvas de fragilidad se derivan diferentes estados de daño, (leve, moderado, extenso y completo) considerando las principales fuentes de incertidumbre. Las funciones de fragilidad son un elemento necesario en la vulnerabilidad y evaluación de riesgos, la probabilidad de estar o exceder un estado de daño ( $S_d$ ), se modela por Hazus (1999) como:

$$P[ds|S_d] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta ds} \ln \left( \frac{S_d}{S_d, ds} \right) \right] \quad \text{ec. 2.1}$$



Donde:

$S_{d,ds}$  = valor medio del desplazamiento espectral en el que el componente alcanza el umbral del estado de daño,  $ds$

$\beta_{ds}$  = desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral del estado de daños,  $ds$

$\phi$  = función de distribución normal estándar acumulada.

### 2.3.1 Descripción de los componentes de transporte

En esta sección se da una breve descripción de cada componente de la infraestructura estratégica, referente a la red de transporte. Se dividen en dos grupos propuestos por Hazus (1999), sistema de transporte de carretera y sistema de transporte ferroviario.

Vialidades: se clasifican como carreteras principales y vías urbanas. Las carreteras principales incluyen carreteras nacionales, estatales y otras carreteras con cuatro carriles o más. Mientras que las vías urbanas incluyen vías interurbanas y otras vías con dos carriles.

Puentes: se clasifican con base a las siguientes características estructurales:

- a) Diseño sísmico
- b) Número de tramos: sencillo o varios tramos de puentes
- c) Tipo de estructura: concreto, acero, otro
- d) Tipo de soporte: monolítico o no monolítico.

Túneles: se clasifican como perforados o cortados y cubiertos.

Vías ferroviarias: Se refiere al suelo donde descansa el montaje de los carriles. Existen puentes y túneles para ferrocarril, ambos se clasifican como se mencionó anteriormente. Las instalaciones del sistema ferroviario incluyen las estaciones suburbanas y urbanas (son los centros de actividad clave para la funcionalidad del sistema) e instalaciones de mantenimiento (no son por lo general críticas para la funcionalidad del sistema).



### 2.3.2 Definición de los estados de daño

Un total de cinco estados de daño se definen para los componentes del sistema de transporte propuestos por Hazus (1999). Estos son ninguno (DS1), ligero/menor (DS2), moderado (DS3), extenso (DS4) y completo (DS5). A continuación, se describe cada estado de daño:

Daño menor (DS2):

- Vialidades: presenta asentamientos ligeros y desplazamientos menores del suelo.
- Puentes: es definido por agrietamientos ligeros y rupturas del contrafuerte, rupturas ligeras en las columnas y agrietamientos menores de la cubierta (los daños no requieren más que una reparación simple).
- Túneles: se producen agrietamientos menores del revestimiento del túnel (los daños no requieren más que una reparación simple).
- Vías ferroviarias: contempla un descarrilamiento menor debido a desplazamientos ligeros del terraplén o del suelo. Para los puentes y túneles ferroviarios, el daño se define de la misma manera como si fuese en carretera. Esto aplica también para (DS3, DS4 y DS5). Mientras que para las estaciones e instalaciones de mantenimiento se tiene un ligero daño.
- Pistas de aterrizaje: se tienen asentamientos y levantamientos menores en la superficie.

Daño moderado (DS3):

- Vialidades: presenta asentamientos y desplazamientos moderados del suelo.
- Puentes: algunas columnas experimentan rupturas y agrietamientos moderados, así como agrietamientos en algunas conexiones y falla de las juntas.
- Túneles: contempla agrietamientos moderados del revestimiento y caída de rocas.
- Vías ferroviarias: presenta un descarrilamiento considerable debido a los asentamientos diferenciales y desplazamientos del suelo. Se requiere la reparación del carril. Asimismo, las estaciones e instalaciones de mantenimiento tienen un daño moderado.



- Pistas de aterrizaje: se define de la misma manera que un daño DS2.

#### Daño Extenso (DS4):

- Vialidades: los asentamientos y desplazamientos del suelo ya son mayores.
- Puentes: se tienen grandes daños en las columnas, sin llegar al colapso (columnas estructuralmente inseguras), lo que significa movimientos significativos en las conexiones, así como desplazamientos verticales de los contrafuertes.
- Túneles: se caracteriza por asentamientos grandes en el portal del túnel y agrietamientos significativos del revestimiento.
- Vías ferroviarias: tiene asentamientos diferenciales mayores del suelo, que conlleva a presentar un descarrilamiento potencial. Por su parte las estaciones e instalaciones de mantenimiento tienen un daño más amplio
- Pistas de aterrizaje: presenta asentamientos y levantamientos considerables en la superficie.

#### Daño completo (DS5):

- Vialidades: se define por importantes asentamientos del suelo, de la misma manera que un daño extenso.
- Puentes: se pierde la conexión debido al colapso de alguna o algunas columnas, lo que conduce al colapso inminente de la cubierta.
- Túneles: se tienen importantes agrietamientos del revestimiento del túnel, el cual puede provocar un posible colapso.
- Vías ferroviarias: los asentamientos diferenciales del suelo y el daño es el mismo al presentado para (DS4). Mientras que las estaciones e instalaciones urbanas presentan un daño completo en sus estructuras.
- Pistas de aterrizaje: presenta asentamientos y levantamientos extensos en la superficie.



## 2.4 Red simplificada

La metodología para la evaluación del riesgo sísmico en las redes de transporte se clasifica en tres niveles: la conectividad, la capacidad y la estimación de pérdida. En el análisis de la conectividad, se le da la atención a la integridad de la red. Se centra en uno de los servicios prestados por la red, por ejemplo, la función de rescate inmediatamente después del sismo, y que pueden ser de interés en la identificación de zonas críticas de la red con respecto a la continuidad de su conectividad (Nuti y Vanzi, 1998; Goretti y Sarli, 2006; Franchin *et al.*, 2006). En el análisis de la capacidad, el ámbito de aplicación se amplía para incluir la consideración de la capacidad de la red para acomodar los flujos de tráfico. El aumento del tiempo de viaje en la red dañada se estima y se traduce a veces en términos monetarios. Esta pérdida indirecta sumada con pérdidas directas debido a daños físicos, se traduce en una primera estimación parcial del impacto económico total de un terremoto (Kiremidjian *et al.*, 2007; Chang *et al.*, 2011). El análisis de la estimación de pérdida de la red se enfoca en la obtención de una estimación realista de pérdida total, incluidos los daños físicos directos a las estructuras (edificios residenciales e industriales, así como componentes de la red), pérdida debido a una menor actividad en los sectores económicos (industria, servicios) y las pérdidas relacionadas con la red (aumento del tiempo de viaje).

La resiliencia en las redes de transporte, se define como la capacidad de la red de transporte para acomodar perturbaciones o desastres y volver a la función normal dentro de un plazo "razonable". La primera etapa, la normalidad, se define como la condición, cuando la red está funcionando en condiciones normales o estándar sin el efecto de las perturbaciones o interrupciones. Cuando se produce una interrupción o perturbación, la red experimenta reducción en el rendimiento, que conduce a la segunda etapa, la etapa de descomposición. La última etapa, es cuando hay un daño inminente, el rendimiento de la red desciende a su nivel mínimo, que puede ser por debajo del umbral mínimo causando un alto total en la red. Después del daño, usuarios de la red intentan encontrar su camino de cualquier manera posible, mediante la búsqueda de rutas alternativas (Argyroudis *et al.*, 2015).



La red de transporte es vital para el funcionamiento de cualquier sociedad. Las interrupciones pueden afectar fuertemente las operaciones de emergencia y rescate inmediatamente después del terremoto, así como el esfuerzo de reconstrucción. Asimismo, el planteamiento de la red simplificada significa la identificación de zonas críticas del área de estudio, tales como cruces entre avenidas principales, edificios de una altura considerable o con características peculiares, áreas donde convergen diferentes modos de transporte o zonas donde el posible colapso de un edificio pueda interrumpir el flujo vehicular de una avenida principal.

## 2.5 Cálculo de riesgo sísmico

El ambiente sísmico de una región está influenciado por factores tales como la magnitud máxima del sismo, distancia del sitio a la fuente de liberación de energía; características geológicas de la roca a lo largo de la trayectoria de transmisión de la onda de la fuente al sitio; mecanismo de la fuente del sismo; efectos de interferencia de la onda relacionada con la dirección y velocidad de ruptura de la falla; y condiciones locales del subsuelo (Seed *et al.*, 1983). Se puede definir el ambiente sísmico por medio de un espectro de peligro uniforme en el cual están incluidos implícitamente los factores antes mencionados. De tal manera se presenta a continuación la metodología para determinar el espectro de peligro uniforme de un afloramiento en roca.

### 2.5.1 Identificación de fuentes sísmicas

Existen diferentes técnicas para definir las fuentes sísmicas en el espacio; una de éstas, lo hace a partir de la información geológica y tectónica, otra combina la información geológica, tectónica y la historia sísmica y una última a partir de los datos sísmicos.



Para definir la sismicidad de una región se debe contar con un catálogo sísmico completo, ya que los resultados de la estimación del peligro sísmico probabilista cambian significativamente al trabajar con un catálogo incompleto (Osorio, 2013).

### 2.5.2 Modelos de recurrencia de sismos

Los modelos de recurrencia permiten determinar el tiempo promedio que tarda en repetirse un sismo de características iguales, en un sitio dado. Para cada fuente sísmica se evalúa un modelo de recurrencia (Osorio, 2013). Existen varios modelos de recurrencia de sismos, entre los más utilizados se tiene:

Modelo de Gutenberg–Richter: Con base en el conocimiento de que las fallas tectónicas son capaces de producir sismos de diversas magnitudes, Gutenberg y Richter (1954) fueron los primeros investigadores que realizaron estudios relacionados con la observación de la magnitud de los sismos, notando que la distribución del tamaño de los sismos en una región sigue generalmente una distribución particular, dada por la siguiente ecuación:

$$\log(\lambda_m) = a - bm \quad \text{ec.2.2}$$

Donde:

$\lambda_m$  = tasa de excedencia de sismos con magnitud mayor o igual que  $m$

$a$  y  $b$  = son constantes y se estiman mediante análisis estadístico de las observaciones históricas de sismos y de datos obtenidos a partir de evidencia geológica. El valor de  $a$  indica la tasa total de sismos en la región y  $b$  indica la razón de sismos de magnitud pequeña y grande.

Habitualmente la ec.2.2 se expresa en forma acumulativa complementaria y exponencial, como:



$$\lambda(M) = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\beta(M-M_0)} & , si M_0 \leq M \leq M_u \\ 0 & , si M > M_u \end{cases} \quad ec.2.3$$

Donde:

$\lambda_0$  = tasa de excedencia para  $M = M_0$ ,  $M_0$  es la magnitud mínima de referencia

$\beta = b \ln(10)$ ,  $M_u$ , es la magnitud máxima considerada.

Modelo Gutenberg-Richter Modificado: Este modelo es una modificación del modelo de Gutenberg y Richter y fue propuesto por Cornell y Vanmarke (1969), es un modelo muy similar al de Gutenberg y Richter para magnitudes cercanas a  $M_0$ , pero que muestra una transición suavizada cuando  $\lambda(M)$  tiende a cero, en  $M = M_u$ , evitando la caída abrupta que presenta el modelo Gutenberg y Richter, el cual queda expresado como:

$$\lambda(M) = \begin{cases} \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} & , si M_0 \leq M \leq M_u \\ 0 & , si M > M_u \end{cases} \quad ec.2.4$$

Existe una ley de recurrencia para sismos característicos propuesta por Ordaz y Reyes (1999), en la cual se asume que el comportamiento de los sismos característicos observados por muchos años por Singh *et al.*, (1983) en la zona de subducción mexicana, que tiene una distribución Gaussiana, y está definida para cada fuente, con la siguiente expresión:

$$\lambda(M) = \lambda(7) \left[ 1 - \Phi \left( \frac{M - EM}{\sigma_M} \right) \right], \quad si M > 7 \quad ec.2.5$$

Donde:

$\lambda(7)$  = tasa de excedencia para  $M > 7$

$EM$  y  $\sigma_M$  = media y desviación estándar de la magnitud respectivamente

$\Phi$  = función de distribución acumulativa normal.



### 2.5.3 Leyes de atenuación

El modelo de atenuación describe el efecto producido en un sitio lejos de la fuente sísmica, debido a la ocurrencia de un evento. Las relaciones de atenuación se expresan como una función matemática, que relaciona el parámetro de movimiento del terreno (suelo firme o roca), como la aceleración máxima del suelo (PGA), con los parámetros que caracterizan el sismo (magnitud del sismo, distancia epicentral de la fuente al sitio y una medida de dispersión del modelo). Algunos modelos incluyen otros términos como el factor de tipo de suelo, el tipo de falla que causa el sismo, o el tipo de sismo en función de su localización hipocentral.

La ley de atenuación propuesta por Reyes (1999), permite estimar la aceleración espectral ( $S_a$ ), en la zona de lomas de la ciudad de México, Ciudad Universitaria (CU), y tiene la siguiente forma funcional:

$$\ln y(T) = \ln S_a(T) = \alpha_1(T) + \alpha_2(T)(M - 6) + \alpha_3(T)(M - 6)^2 + \alpha_4(T)\ln R + \alpha_5(T)R + \varepsilon(T) \quad \text{ec.2.6}$$

Donde:

$y$  = aceleración máxima del terreno en alguna de las direcciones ortogonales, o su media geométrica, MG,  $\text{cm/s}^2$

$M_w$  = magnitud de momento sísmico

$R$  = distancia mínima al área de ruptura, km

$\alpha_i$  = valores de los coeficientes para la media geométrica, MG, de la aceleración espectral.



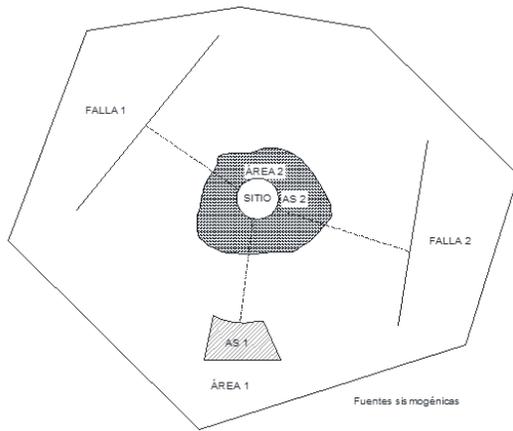
Una vez establecidas, las zonas sismogénicas, los modelos de recurrencia sísmicos y los modelos de predicción del movimiento del suelo en el sitio, se tienen todos los elementos necesarios para resolver la integral de peligro sísmico, según el planteamiento probabilista de Cornell (1968). El peligro se evalúa entonces como la probabilidad de superar un valor umbral del parámetro de movimiento en el sitio, debido a la actividad de todas las zonas sismogénicas que rodean al mismo, y que pueden contribuir al movimiento esperado.

Las curvas de peligro sísmico probabilista se obtienen con base en la información y teoría establecida previamente.

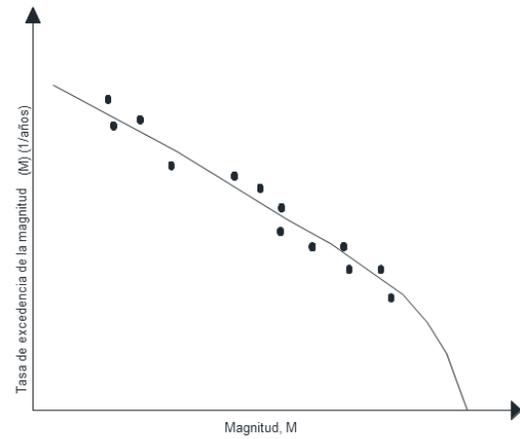
#### 2.5.4 Espectro de peligro uniforme

El espectro de peligro uniforme representa la relación entre el periodo natural de vibración ( $T$ ) y una aceleración espectral ( $S_a$ ), para una probabilidad de excedencia dada, asociada a un periodo de retorno (Osorio, 2013).

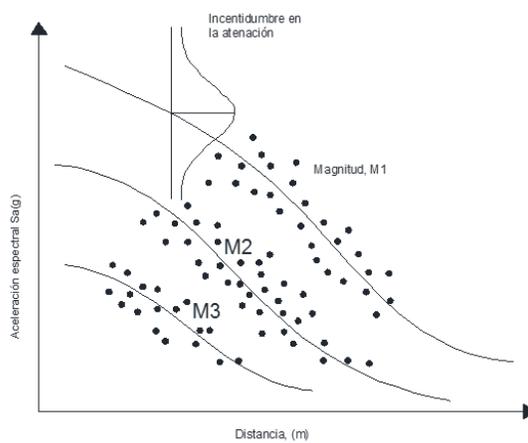
En la Figura 2.1 se observa de forma esquemática los pasos que se siguen en un análisis de peligro sísmico probabilista. Paso 1) definición de las fuentes sismogénicas; paso 2) definición de un modelo de recurrencia sísmica; paso 3) desarrollo de un modelo de atenuación; paso 4) cálculo de curvas de peligro sísmico y del espectro de peligro uniforme.



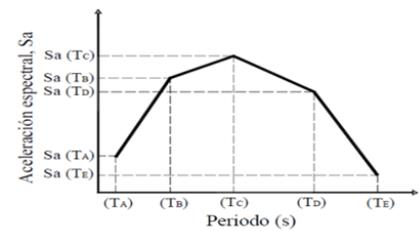
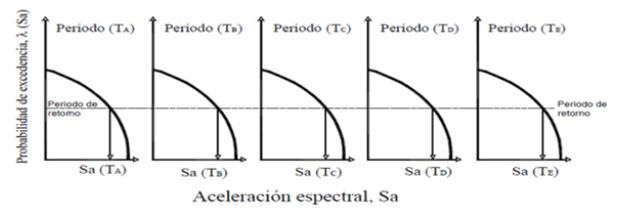
**Paso 1**



**Paso 2**



**Paso 3**



**Paso 4**

Figura 2.1 Pasos para realizar un análisis de peligro sísmico probabilista (Osorio, 2013)



## 2.6 Estimación de la resiliencia sísmica

La resiliencia sísmica de los sistemas de infraestructura estratégica es un concepto de rápido desarrollo en el campo del desastre. Promoviendo comunidades resilientes y rápidamente recuperables en caso de un evento extremo (Karamlou y Bochini, 2015).

La falta de funcionalidad de la infraestructura después ocurrido un sismo puede afectar significativamente los sistemas de transporte y afectar el proceso de recuperación. Riesgo y resiliencia son importantes indicadores de rendimiento asociados a los sistemas estructurales en los eventos extremos. Cuando se produce un sismo principal, la funcionalidad de la infraestructura puede descender hasta un valor crítico. El costo de reconstrucción de una estructura puede ser relativamente alta, pero la pérdida de funcionalidad puede producir consecuencias mucho más grandes (es decir, pérdida indirecta) (Karamlou y Bochini, 2015).

La resiliencia es un concepto multifacético que integra la capacidad de soportar un evento extremo y recuperarse rápidamente a un nivel funcional satisfactorio. La capacidad de recuperación de un sistema se calcula como:

$$R = \frac{1}{t_h - t_0} \int_{t_0}^{t_h} Q(t) dt \quad \text{ec.2.7}$$

Donde:

$t_0$  = tiempo de ocurrencia del evento extremo

$t_h$  = tiempo límite analizado

$Q(t)$  = funcionalidad de la estructura, relacionado con el tiempo de recuperación.

La capacidad de recuperación, calculado por la ec.2.7 se puede ilustrar gráficamente como se muestra en la Figura 2.2 con y sin consideración de los efectos de réplicas. Como se muestra cualitativamente en esta figura, un valor más pequeño de la capacidad de recuperación resulta cuando los efectos asociados con las réplicas se incorporan dentro de proceso de evaluación de la funcionalidad sísmica.

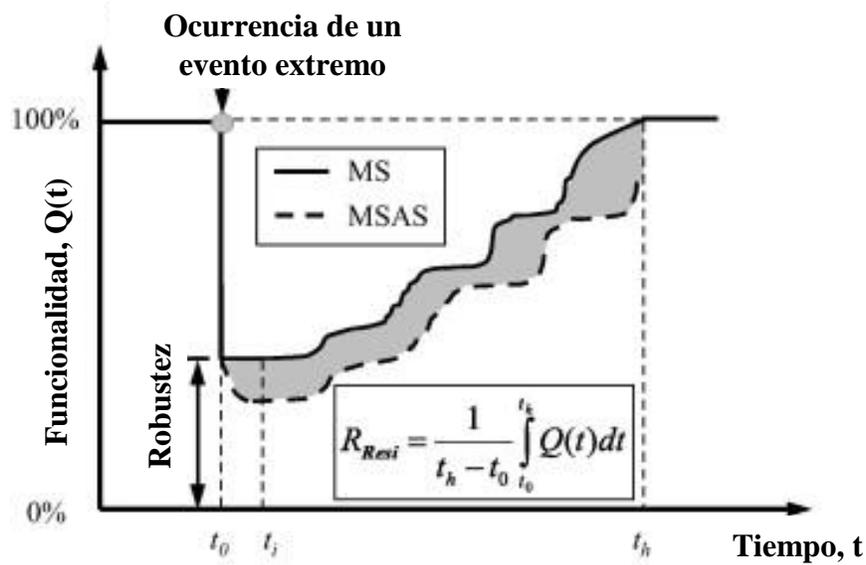


Figura 2.2 Representación de la capacidad de recuperación, sismo principal (MS) y con replicas (MSAS) (Karamlou y Bochini, 2015)

Para la probabilidad del análisis de la resiliencia, la funcionalidad esperada,  $Q(t)$ , de la estructura en cada instante  $t$ , se puede estimar usando un enfoque basado en el teorema de probabilidad total, que se calcula como:

$$Q(t) = \sum_{s=1}^{nIM} P(IM = s) \sum_{d=1}^{nDS} P(DS = d | IM = s) Q_d(t)$$

ec.2.8

Donde:

$Q_d(t)$  = funcionalidad de la estructura en el tiempo  $t$ , con un nivel de daño inicial  $d$

$P(DS=d | IM=s)$  = probabilidad condicional de estar en el estado de daño  $d$ , dado el escenario de evento con  $IM=s$ , calculado con el análisis de las curvas de fragilidad

$P(IM=s)$  = probabilidad de ocurrencia de eventos extremos generando la intensidad  $s$ , calculada por un análisis de riesgo sísmico probabilístico.



### 3 CASO DE ESTUDIO: ESTIMACIÓN DE LA RESILIENCIA SÍSMICA EN LA ZONA CENTRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

#### 3.1 Definición de la zona de estudio

Desde el punto de vista geotécnico, la zona centro de la Ciudad de México se encuentra ubicada en la zona lacustre (zona lago), de acuerdo con el código de construcción de la Ciudad de México, RCDF (2004). Durante el devastador terremoto de Michoacán se observaron daños importantes en esta zona, por lo que se tomó como caso estudio en esta tesis (Figura 3.1).

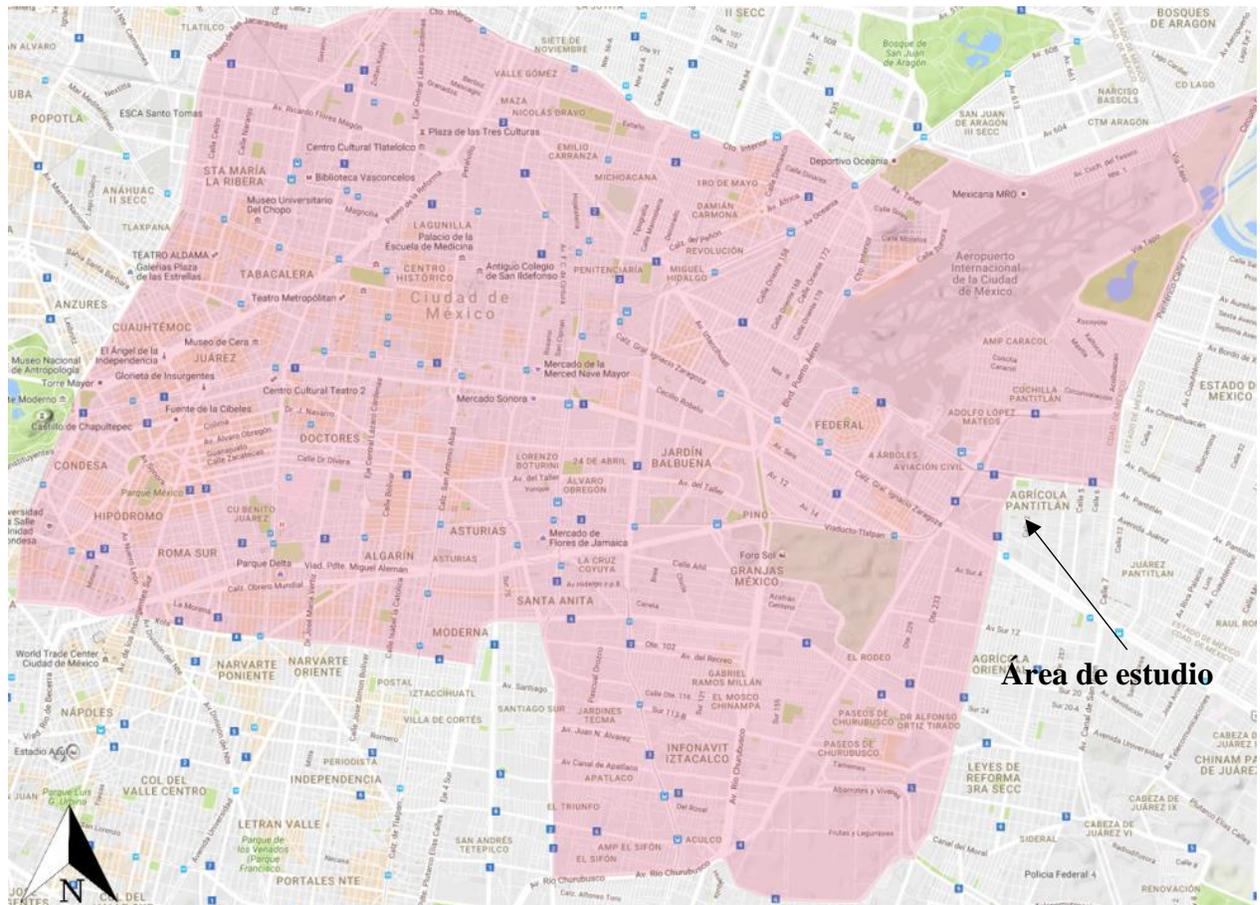


Figura 3.1. Zona centro de la Ciudad de México

### 3.2 Levantamiento de infraestructura estratégica

La zona de estudio está comprendida por una amplia gama de infraestructura estratégica. Con respecto a la red de transporte cuenta con líneas de metro, metrobús (BRT), el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, puentes a desnivel, viaductos y vías urbanas, además de contar con un número considerable de edificios importantes como edificios gubernamentales, edificios para recinto de eventos, escuelas, plazas comerciales, hoteles, templos, viviendas o zonas habitacionales, museos, y zona de hospitales. En la Figura 3.2 observamos los componentes que forman la infraestructura estratégica en la zona de estudio. Mientras que en la Tabla 3.1 señalamos cada componente.

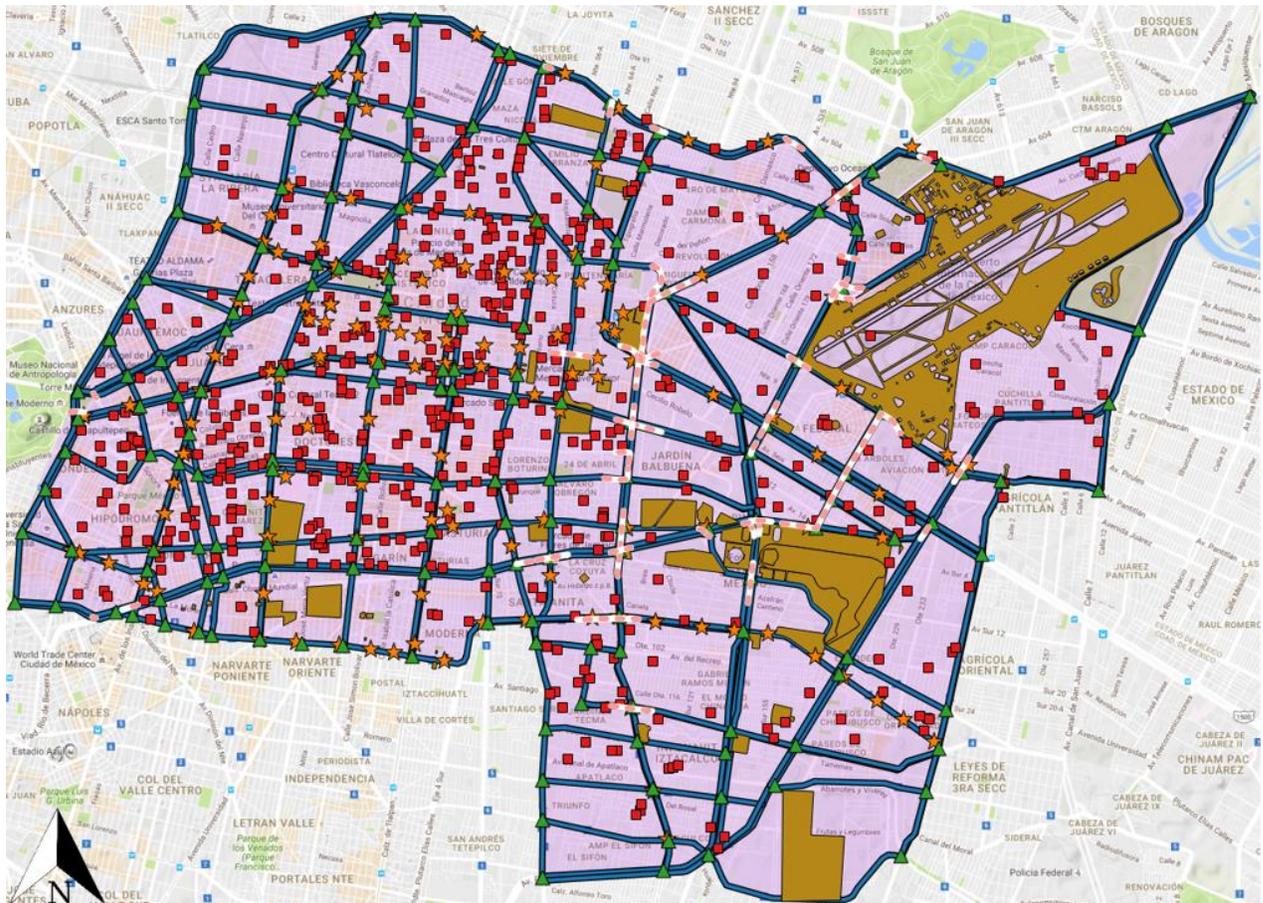


Figura 3.2. Levantamiento de la infraestructura estratégica realizado



Tabla 3.1. Identificación de la infraestructura estratégica en la zona de estudio

Infraestructura estratégica	Símbolo
Edificios	
Puentes y pasos a desnivel	
Nodos	
Red de transporte	
Vías urbanas	

La infraestructura estratégica se conformó por 521 edificios de los cuales algunos son escuelas, mercados, templos, plazas comerciales, centros de atención médica, hospitales, por mencionar algunos. Asimismo, se tuvieron 16 pasos a desnivel y 29 puentes, ambos en total operación, variando solo el número de carriles y sentido. Se obtuvieron 170 nodos, llamamos nodo a una intersección de vías urbanas principales. La red de transporte la conformaron 152 estaciones, tanto de metro como de metrobús. Por último, se identificaron alrededor de 622 vías urbanas principales, las cuales conforman la red simplificada.

### 3.3 Curvas de fragilidad

Para evaluar la vulnerabilidad de los elementos de la infraestructura estratégica de la zona de estudio, se asignaron curvas de fragilidad, tal como se muestra en la Tabla 3.2. Estas curvas constituyen uno de los elementos clave de la evaluación probabilista de riesgo sísmico. En estas curvas se relaciona el parámetro de intensidad sísmica (PGA, PGD o PGV) con la probabilidad de alcanzar o superar un nivel de daño (leve, moderado, extenso y colapso) para cada elemento en riesgo.



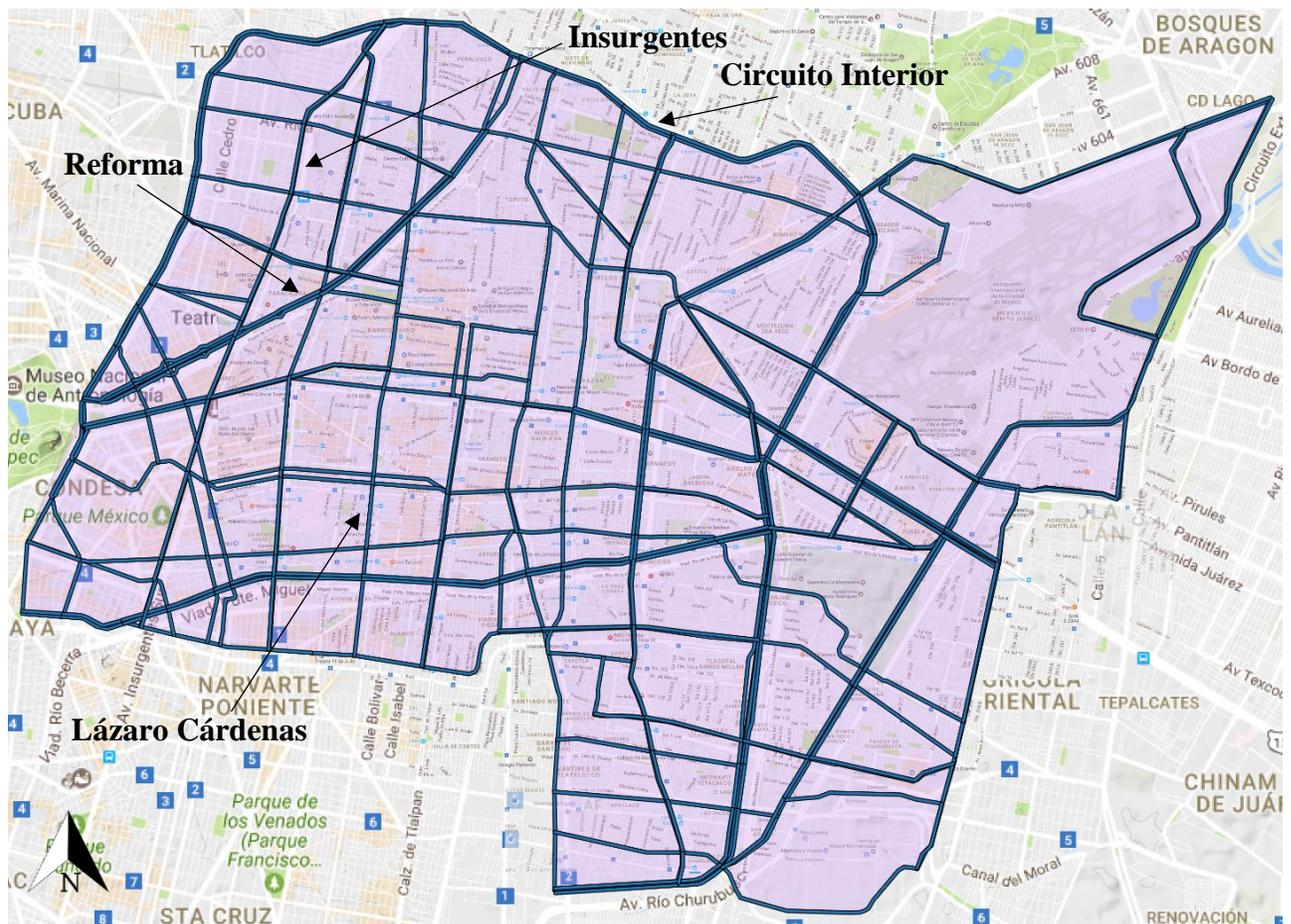
Tabla 3.2. Curvas de fragilidad utilizadas para la infraestructura estratégica

<b>Infraestructura</b>	<b>Referencia</b>	<b>Medida de Intensidad</b>
Edificios de concreto	(Pejovic <i>et al.</i> , 2016)	PGA
Edificios de acero	(Kiani <i>et al.</i> , 2016)	PGA
Edificios de mampostería	(Pitilakis <i>et al.</i> , 2016)	PGA
Templos	(Asteris <i>et al.</i> , 2014)	PGA
Puentes	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)	PGA
Metro	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)	PGA
Metrobús	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)	PGD
Pistas de aterrizaje	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)	PGD
Vías urbanas	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)	PGD
Túneles	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)	PGD

### 3.4 Red simplificada

Con la red simplificada se busca tener una red donde solamente se contemplen las avenidas principales, para observar la afectación que tendría dicha red después ocurrido el sismo. Estas afectaciones pueden conllevar a tener una pérdida de conectividad debido al agrietamiento de dicha avenida, es decir, que la circulación sea imposible o en su caso que algún o algunos edificios colapsen y los escombros de la estructura de igual manera imposibiliten el tránsito.

En la Figura 3.3 se muestra la red simplificada, avenidas principales como Periférico, Insurgentes, Reforma, Lázaro Cárdenas, Tlalpan, Circuito Interior, entre otras, son tomadas en cuenta. Cada una de ellas contempla el número de carriles que posee, la velocidad de flujo libre con la que se transita y los horarios en el que la demanda de circulación es mayor.



*Figura 3.3 Área de estudio con la red simplificada*

### 3.5 Condiciones geotécnicas del subsuelo

Datos demuestran que prácticamente todas las estructuras que se derrumbaron o sufrieron daños mayores en el terremoto del 19 de septiembre de 1985 se encuentran dentro de la zona centro de la Ciudad de México. Dentro de esta zona, la profundidad de la capa dura típicamente oscila entre los 26 y 44 metros (Seed *et al.*, 1988).



Fuertes registros de movimiento del terremoto del 19 de septiembre de 1985 se obtuvieron en varios sitios alrededor de la Ciudad de México, un sitio específico es un edificio de construcción de la SCT, en donde las condiciones del suelo son muy semejantes a las del área de mayor daño, donde se tienen depósitos de arcilla de aproximadamente 37 m de espesor (Seed *et al.*, 1988).

Los registros de movimiento del terremoto obtenidos para el sitio de la SCT indican que hubo una mayor amplificación de los movimientos por los depósitos de arcilla blanda que subyacen en este sitio. La aceleración máxima del suelo fue de aproximadamente 0.17 g y la aceleración espectral máxima con el 5% de amortiguación fue de aproximadamente 1.0 g en un periodo de aproximadamente 2 segundos (Seed *et al.*, 1988).

En la Figura 3.4 se presenta el perfil estratigráfico representativo de la zona de estudio.

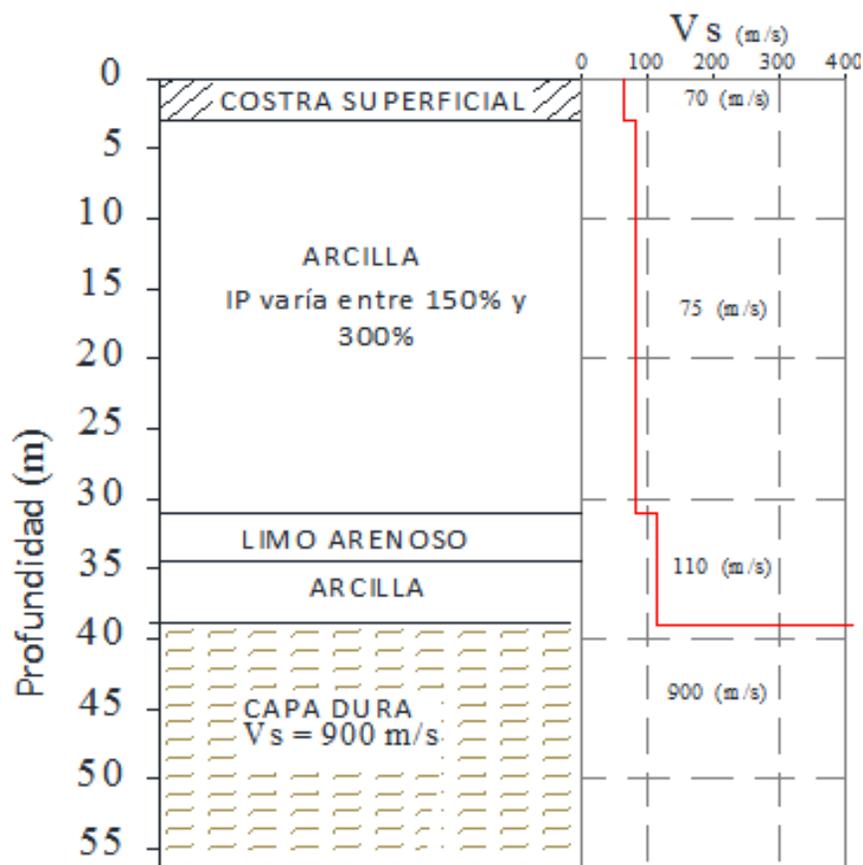


Figura 3.4. Perfil de suelo representativo de la zona de estudio (Seed *et al.*, 1988).



### 3.6 Cálculo de riesgo sísmico

El ambiente sísmico del sitio se caracterizó en función de dos espectros de peligro uniforme, EPU, uno para un sismo normal y otro para un sismo de subducción, desarrollados para la estación sismológica localizada en C.U., se consideran cuatro periodos de retorno,  $T_r$ : 125, 250, 475 y 2475 años. Los EPU desarrollados son presentados en la Figura 3.5, los cuales fueron utilizados para obtener movimientos de entrada para los análisis de respuesta del sitio con ayuda del programa de computación RADSH propuesto por Bárcena A. y Romo M.P. (1994).

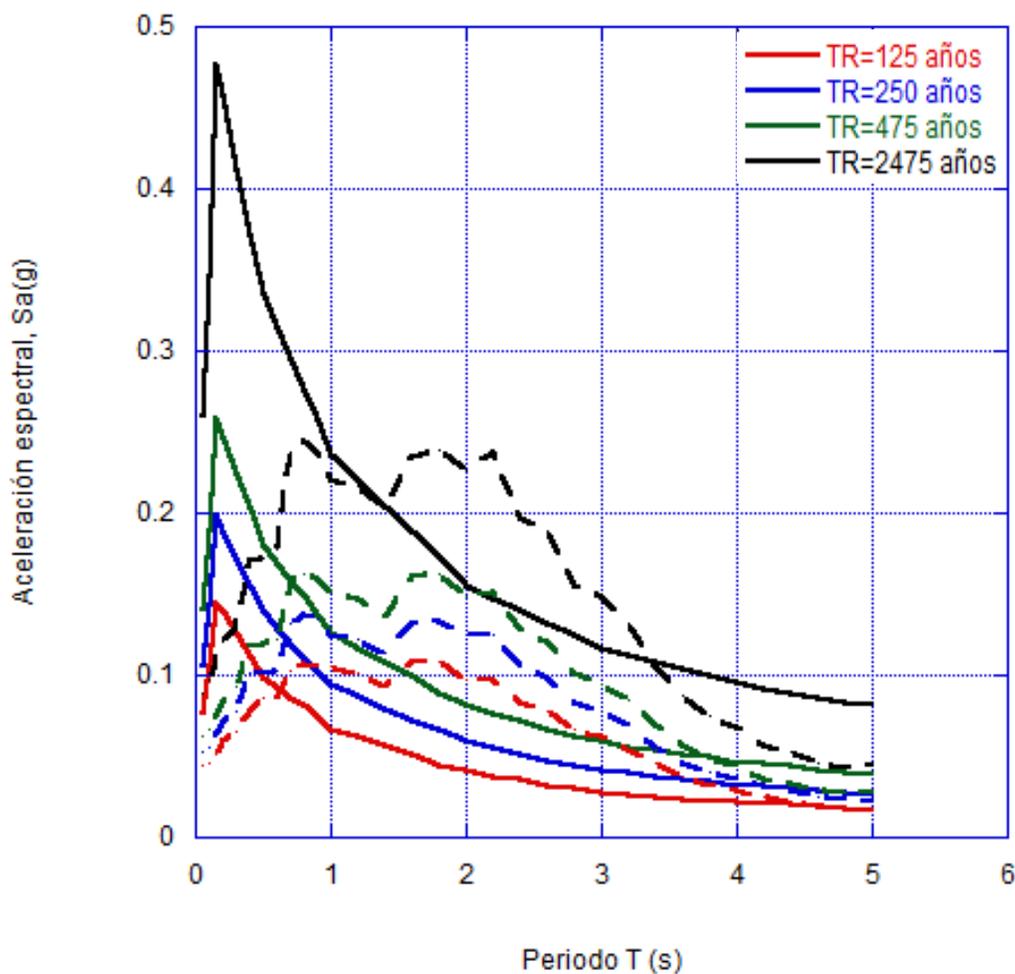


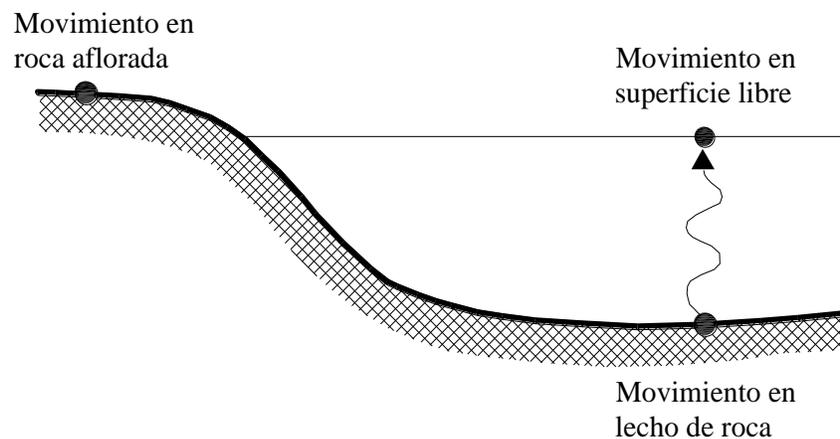
Figura 3.5. EPU, sismos normales (líneas continuas), sismos de subducción (líneas discontinuas)



### 3.6.1 Análisis de respuesta de sitio

El análisis de respuesta de sitio de un depósito de suelo consiste en predecir el comportamiento de éste ante una excitación sísmica. De este análisis, generalmente se obtienen historias de aceleraciones, velocidades, desplazamientos, entre otros, toda esta información nos permite estimar riesgos asociados con los movimientos del terreno, y así determinar las fuerzas inducidas por un sismo que puedan llevar a la inestabilidad del suelo y las estructuras que soporta.

Los análisis de respuesta de sitio unidimensionales se basan en la suposición de que todas las fronteras son horizontales y que la respuesta de un depósito de suelo es predominantemente causada por las ondas de corte horizontales, SH, que se propagan verticalmente desde los estratos de mayor impedancia dinámica, comúnmente llamada lecho de roca como se muestra en la Figura 3.6. Para estos análisis se asume que el suelo y la superficie de la base se extienden infinitamente en la dirección horizontal.



*Figura 3.6. Nomenclatura de respuesta de sitio*

Bárcena y Romo (1994), desarrollaron el programa RADSH, para realizar análisis de respuesta de sitio probabilista. Con el uso de la teoría de vibraciones aleatorias, las respuestas pico de un sistema lineal excitado por un proceso estocástico se calculan para límites de confianza dados (probabilidad de no excedencia). Físicamente, tal definición del ambiente



sísmico es equivalente a considerar una infinidad de historias de aceleraciones con el mismo contenido de frecuencias medio pero con fases aleatoriamente distribuidas.

Los espectros de respuesta obtenidos con RADSH se muestran en la Figura 3.7, tanto para un sismo normal como para un sismo de subducción. Se observó que los periodos de movimiento predominantes asociados a eventos de subducción, tales como los que se presentan en la Ciudad de México, tienden a enfocar la energía en el rango de periodos de (1.8 a 2.5s).

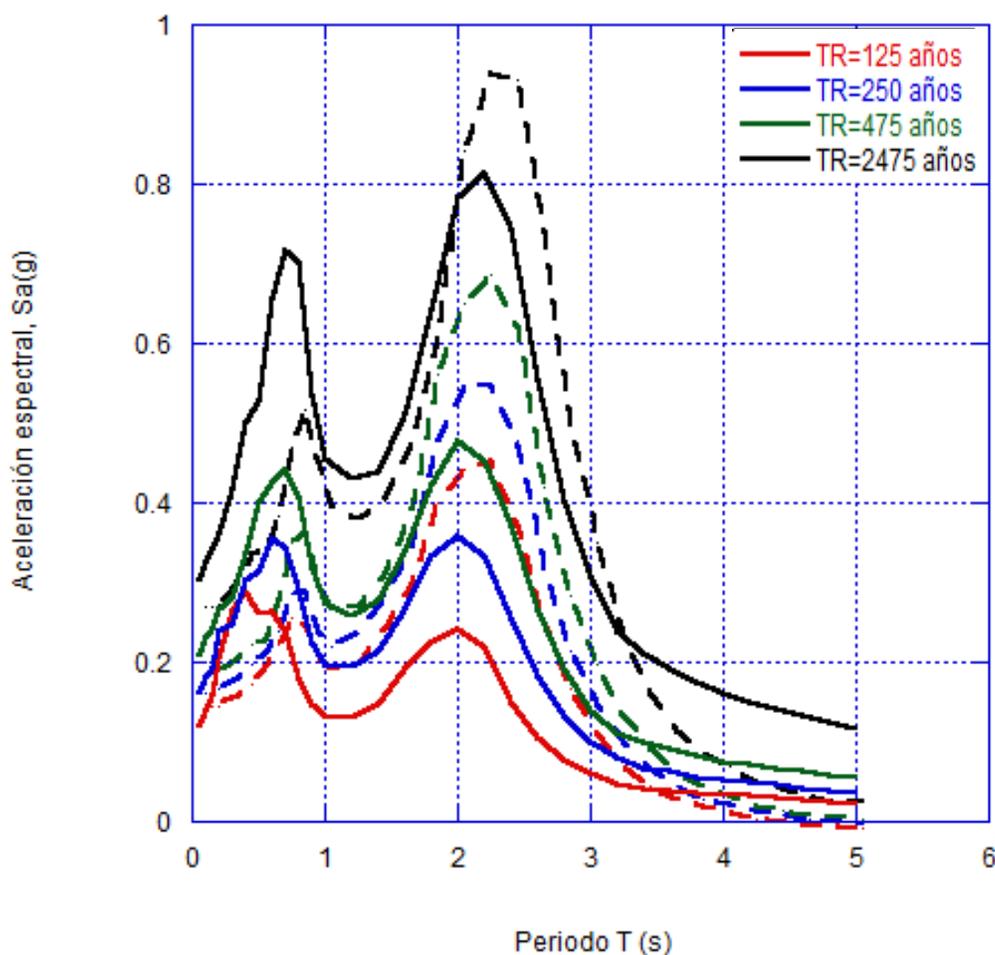


Figura 3.7. Espectros de respuesta, sismos normales (líneas continuas), sismos de subducción (líneas discontinuas)



La PGA aumentó conforme se incrementó el  $T_r$ , tanto para sismos normales como para sismos de subducción. Tabla 3.3.

Tabla 3.3. PGA para los diferentes periodos de retorno,  $T_r$

Sismos normales	PGA(g)	Sismos de subducción	PGA(g)
$T_r = 125$ años	0.121	$T_r = 125$ años	0.202
$T_r = 250$ años	0.162	$T_r = 250$ años	0.227
$T_r = 475$ años	0.207	$T_r = 475$ años	0.255
$T_r = 2475$ años	0.302	$T_r = 2475$ años	0.357

Para obtener la probabilidad de falla de la infraestructura estratégica con las curvas de fragilidad asignadas, se entró directamente con el PGA obtenido de los espectros de respuesta y se calculó la probabilidad de daño, (menor, moderado, extenso o completo). Túneles, pistas de aterrizaje del aeropuerto, BRT y vías urbanas tienen un parámetro de intensidad sísmico de PGD. Para hacer la conversión de PGD a PGA se sigue el criterio propuesto por Argyroudis *et al.*, (2013).

Donde:

$$PGD = 0.38PGA^{2.08} \tag{ec.3.1}$$

En las siguientes tablas se muestran los daños que presentó la infraestructura estratégica de la zona de estudio, primeramente, se calcularon los daños de manera generalizada y después se identificaron una serie de estructuras críticas, dichas estructuras se tomaron en cuenta para hacer un análisis de colapso/bloqueo de avenidas.



Tabla 3.4 Probabilidad de falla presentando daños leves

Infraestructura	Probabilidad de falla (%)				Probabilidad de falla (%)			
	Sismo de subducción				Sismo normal			
	(T <sub>r</sub> )				(T <sub>r</sub> )			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Edificios de concreto	60	70	75	85	25	45	60	80
Edificios de acero	0	0	2	8	0	0	0	3
Templos	95	97	98	99	80	90	95	98
Puentes vehiculares	25	30	40	65	5	13	25	55
Metro	20	25	40	63	5	10	22	50
Metrobús	3	5	7	10	0	2	3	8
Túneles	0	0	3	10	0	0	0	5
Pistas aterrizaje	15	25	35	75	0	5	20	50
Torre Latinoamericana	0	0	2	8	0	0	0	3
Central de abastos	60	70	75	85	25	45	60	80
Hospital general	60	70	75	85	25	45	60	80
Palacio de los Deportes	60	70	75	85	25	45	60	80
Templo Sta. Veracruz	95	97	98	99	80	90	95	98
Palacio de Gobierno	95	97	98	99	80	90	95	98
Palacio de Bellas Artes	60	70	75	85	25	45	60	80
Catedral Metropolitana	95	97	98	99	80	90	95	98
Avenida Insurgentes	3	5	7	10	0	2	3	8
Avenida Reforma	3	5	7	10	0	2	3	8



Tabla 3.5 Probabilidad de falla presentando daños moderados

Infraestructura	Probabilidad de falla (%)				Probabilidad de falla (%)			
	Sismo de subducción				Sismo normal			
	(T <sub>r</sub> )				(T <sub>r</sub> )			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Edificios de concreto	18	25	28	50	5	12	18	42
Edificios de acero	0	0	0	0	0	0	0	0
Templos	85	90	92	97	65	72	84	97
Puentes vehiculares	13	20	28	50	3	8	13	45
Metro	3	6	9	17	0	0	4	12
Metrobús	0	2	5	7	0	0	0	5
Túneles	0	0	0	3	0	0	0	0
Pistas aterrizaje	15	25	35	75	0	5	20	50
Torre Latinoamericana	0	0	0	0	0	0	0	0
Central de abastos	18	25	28	50	5	12	18	42
Hospital general	18	25	28	50	5	12	18	42
Palacio de los Deportes	18	25	28	50	5	12	18	42
Templo Sta. Veracruz	85	90	92	97	65	72	84	97
Palacio de Gobierno	85	90	92	97	65	72	84	97
Palacio de Bellas Artes	18	25	28	50	5	12	18	42
Catedral Metropolitana	85	90	92	97	65	72	84	97
Avenida Insurgentes	0	2	5	7	0	0	0	5
Avenida Reforma	0	2	5	7	0	0	0	5



Tabla 3.6 Probabilidad de falla presentando daños extensos

Infraestructura	Probabilidad de falla (%)				Probabilidad de falla (%)			
	Sismo de subducción				Sismo normal			
	(T <sub>r</sub> )				(T <sub>r</sub> )			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Edificios de concreto	3	5	7	15	1	2.5	3	11
Edificios de acero	0	0	0	0	0	0	0	0
Templos	70	75	81	95	45	65	70	95
Puentes vehiculares	7	10	12	30	0	4	7	22
Metro	2	3	7	10	0	0	2	7
Metrobús	0	0	0	3	0	0	0	0
Túneles	0	0	0	0	0	0	0	0
Pistas aterrizaje	2	4	8	15	0	0	4	10
Torre Latinoamericana	0	0	0	0	0	0	0	0
Central de abastos	3	5	7	15	1	2.5	3	11
Hospital general	3	5	7	15	1	2.5	3	11
Palacio de los Deportes	3	5	7	15	1	2.5	3	11
Templo Sta. Veracruz	70	75	81	95	45	65	70	95
Palacio de Gobierno	70	75	81	95	45	65	70	95
Palacio de Bellas Artes	3	5	7	15	1	2.5	3	11
Catedral Metropolitana	70	75	81	95	45	65	70	95
Avenida Insurgentes	0	0	0	3	0	0	0	0
Avenida Reforma	0	0	0	3	0	0	0	0



Tabla 3.7 Probabilidad de falla presentando daños completos

Infraestructura	Probabilidad de falla (%)				Probabilidad de falla (%)			
	Sismo de subducción				Sismo normal			
	(T <sub>r</sub> )				(T <sub>r</sub> )			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Edificios de concreto	2	3	3.5	8	0	0	2	4
Edificios de acero	0	0	0	0	0	0	0	0
Templos	70	75	81	95	45	65	70	95
Puentes vehiculares	4	6	8	16	0	2	4	12
Metro	2	3	7	10	0	0	2	7
Metrobús	0	0	0	0	0	0	0	0
Túneles	0	0	0	0	0	0	0	0
Pistas aterrizaje	0	0	0	0	0	0	0	0
Torre Latinoamericana	0	0	0	0	0	0	0	0
Central de abastos	2	3	3.5	8	0	0	2	4
Hospital general	2	3	3.5	8	0	0	2	4
Palacio de los Deportes	2	3	3.5	8	0	0	2	4
Templo Sta. Veracruz	70	75	81	95	45	65	70	95
Palacio de Gobierno	70	75	81	95	45	65	70	95
Palacio de Bellas Artes	2	3	3.5	8	0	0	2	4
Catedral Metropolitana	70	75	81	95	45	65	70	95
Avenida Insurgentes	0	0	0	0	0	0	0	0
Avenida Reforma	0	0	0	0	0	0	0	0

### 3.6.2 Análisis de edificios colapsados

El volumen y la extensión de escombros de los edificios colapsados dependen de la geometría del edificio (sobre todo la altura) y el tipo de colapso. Este último depende de las características del sismo, condiciones del suelo, diseño del edificio y la continuidad de las fachadas. Cuando las fachadas de los edificios son continuas, lo cual es un caso típico en ciudades densamente pobladas, los edificios están en contacto y la dirección de colapso está limitada en los lados laterales, por lo que el colapso es posible que se produzca principalmente en la parte frontal y/o lateral del edificio (Argyroudis *et al.*, 2015). Casos críticos para el bloqueo de avenidas son el colapso tipo vuelco, debido al fenómeno de licuación, los montones de escombros son de gran extensión (Figura 3.8).



*Figura 3.8. Edificio volcado, terremoto de la Ciudad de México en 1985*

La conectividad debido al derrumbe de un edificio se estudió con base a los modelos geométricos simplificados propuestos por Argydoguilis *et al.*, (2015), tal como se representa en la Figura 3.9. La distancia mínima necesaria para evitar el bloqueo es función del volumen del edificio. Una estimación de los alcances se llevó a cabo suponiendo cualquiera de los modos de falla de un edificio, la correlación de la altura de los edificios ( $Y$ ) con la anchura de los escombros ( $W_d$ ) la cual se extiende más allá de la anchura inicial del edificio ( $W$ ). Estos modelos de colapso pueden ser en una dirección (A y B), en dos direcciones (C) y de vuelco del edificio con el modelo (D). Partiendo del hecho que el volumen del edificio colapsado ( $V_T$ ) es una fracción ( $k_v$ ) del volumen original ( $V_o$ ), se puede definir una ecuación para cada modelo. Así el ancho de los escombros ( $W_d$ ) es una función de  $W$ ,  $c$ ,  $k_v$ , y  $Y$  (Figura 3.10). El ángulo  $c$  describe la inclinación del colapso.

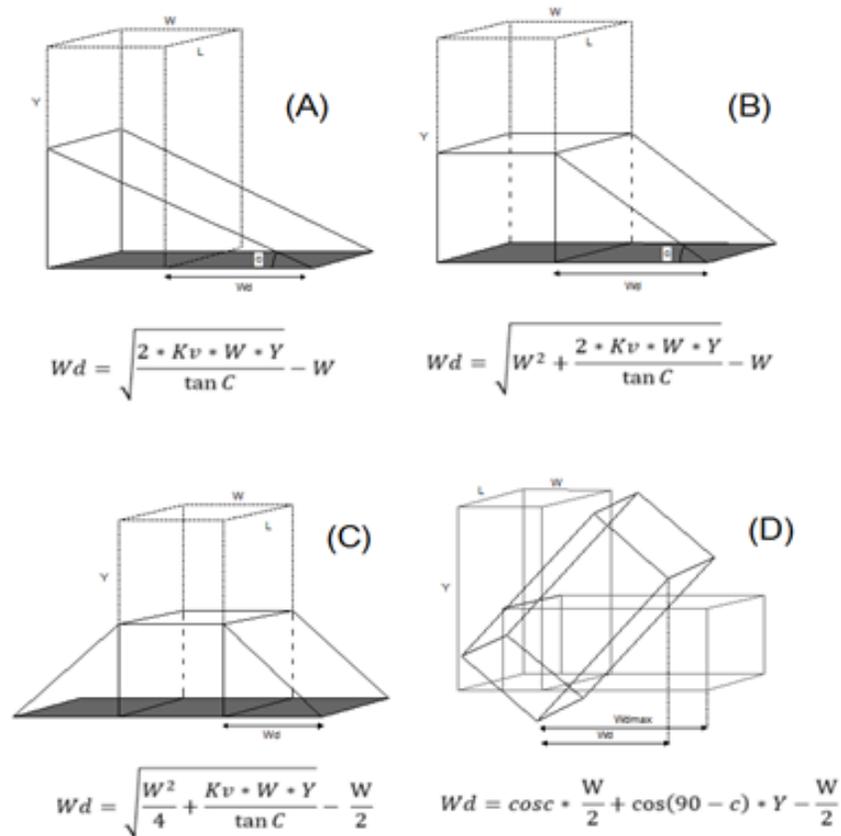


Figura 3.9. Estimación del ancho de los escombros ( $W_d$ ) para el colapso en una dirección (A, B), dos direcciones (C) y vuelco (D)

La Tabla 3.8 muestra los parámetros geométricos considerados para algunas estructuras críticas. Mientras que la Tabla 3.9 resume tanto las distancias de bloqueo para los edificios críticos para cada modo de falla, como las distancias correspondientes desde el borde del edificio hasta el centro de la avenida más cercana (Figura 3.10).

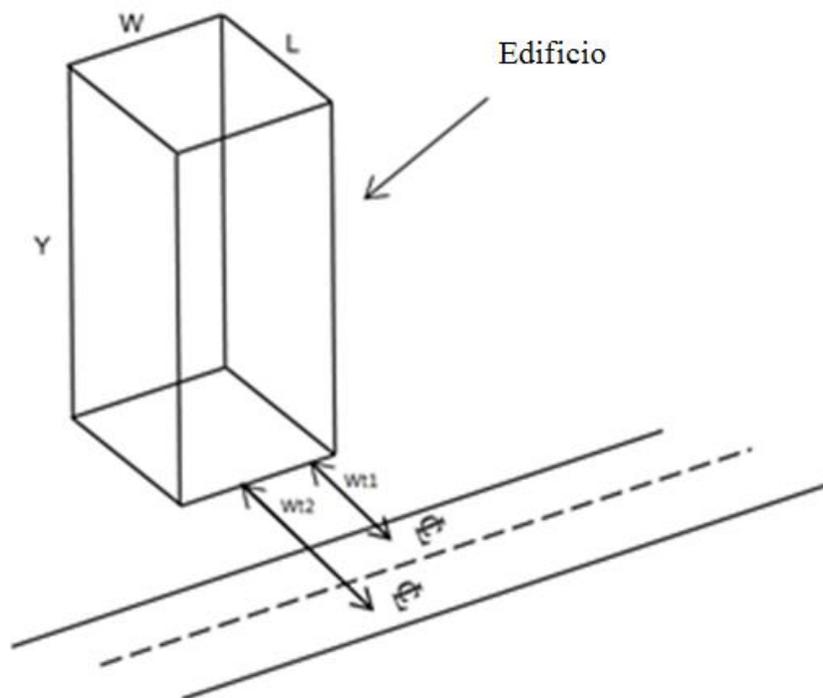


Figura 3.10. Distancia desde el borde del edificio hasta el centro de la avenida más cercana,  $Wt1$  y  $Wt2$ .

El parámetro  $k_v$  se tomó como 0.7 y 0.3 para mampostería y edificios de concreto reforzado, respectivamente. Aunque la probabilidad de daño estimada para los edificios históricos es alta, cabe señalar que las curvas de fragilidad de este tipo de edificios, Asteris *et al.*, (2014) están relacionadas con sismos que presentan una concentración de energía en el rango de periodos de (0.2 a 0.75s), Pestana *et al.*, (1999).



Tabla 3.8 Parámetros geométricos de estructuras críticas

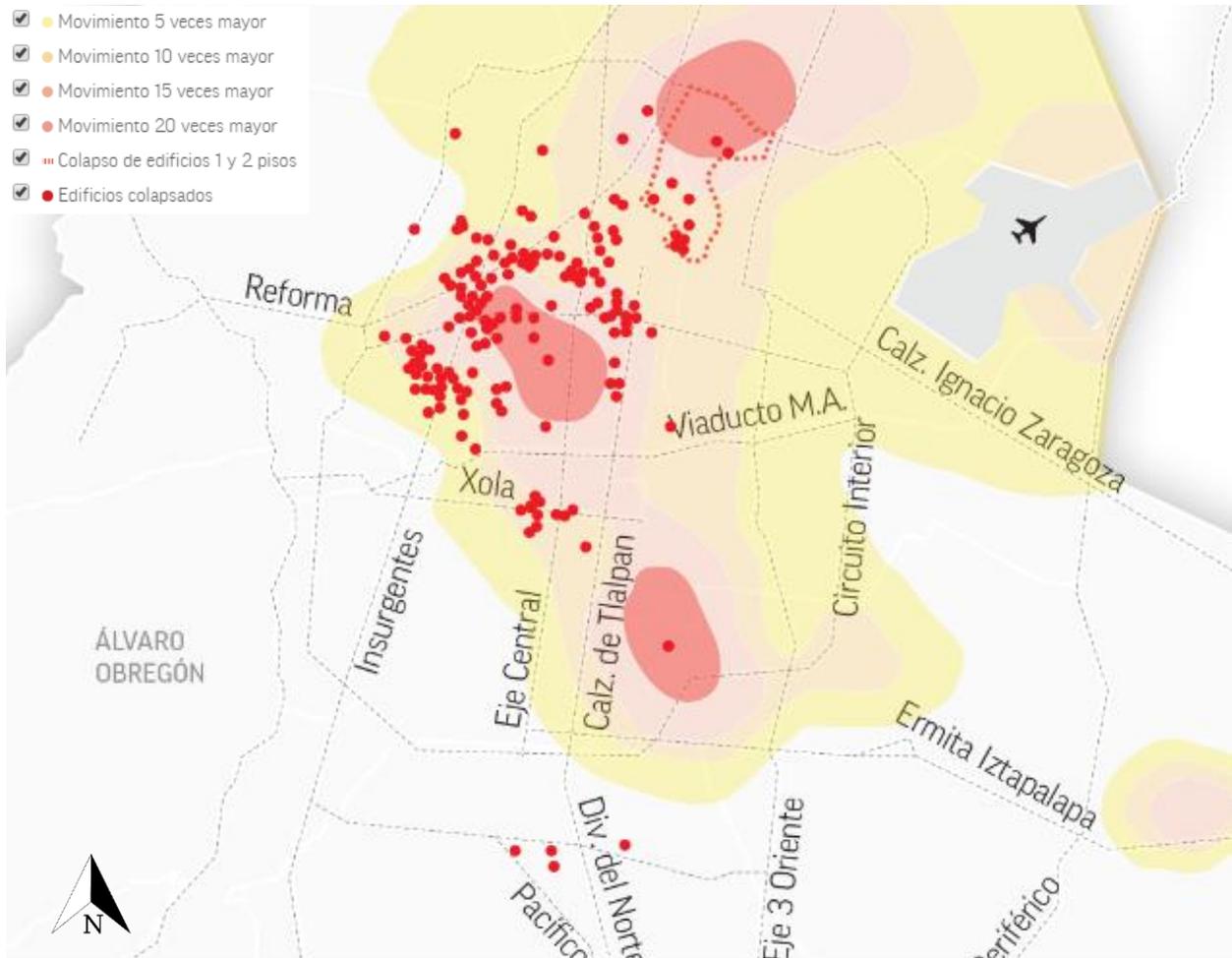
Edificio	Parámetros geométricos			
	Y (m)	W (m)	K <sub>v</sub> (%)	c (°)
Central de abastos	12	35	0.3	15
Hospital General de México	22	15	0.3	15
Templo Sta. Veracruz	25	12	0.7	15
Palacio de Bellas Artes	52	30	0.7	15
Palacio de los Deportes	45	150	0.3	15
Catedral Metropolitana	45	40	0.7	15
Palacio de Gobierno	18	70	0.7	15

Tabla 3.9 Distancias críticas de bloqueo con los diferentes modos de falla

Edificio	Modelos de colapso - W <sub>d</sub>				Wt1 (m)	Wt2 (m)	Conectividad Avenida
	A (m)	B (m)	C (m)	D (m)			
Central de abastos	0	11.5	10.3	2.5	30	-	Disponible
Hospital General de México	12.1	16	13.1	5.4	9.5	21.5	Bloqueada
Templo Sta. Veracruz	27.5	29.3	22.6	6.2	13	25	Bloqueada
Palacio de Bellas Artes	60.2	65.1	50.7	12.9	20	-	Bloqueada
Palacio de los Deportes	0	43.95	39.82	2.6	80	-	Disponible
Catedral Metropolitana	59.9	64.9	51.4	11	45	-	Bloqueada
Palacio de Gobierno	11.1	37.1	32.2	3.4	28	35	Bloqueada

Se observa que la mayoría de las estructuras críticas consideradas bloquean la avenida respectiva, es decir, habría una pérdida de conectividad debido al posible colapso que presentarían.

Se sabe que cerca de 800 edificios colapsaron o fueron seriamente dañados durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 (Figura 3.11). En esta misma figura se indica la amplificación del movimiento del suelo en el Valle de México con respecto al movimiento observado en la zona de lomas que circundan la ciudad. Estas amplificaciones son las que experimentan ondas de oscilación (periodo) que tardan 2 segundos en completarse (Cruz, 2013).



*Figura 3.11. Recuento de los daños ocasionados y amplificación del movimiento del suelo en el Valle de México (Cruz, 2013)*

### 3.6.3 Red simplificada con los posibles bloqueos

A continuación, se muestra la red simplificada con las avenidas propensas a sufrir bloqueo de acuerdo al análisis de colapso de edificios (Figura 3.12). La probabilidad de falla para daños leves y moderados en avenidas es un tanto baja, en el rango del 3 al 10%, mientras que para daños extensos y completos la probabilidad es nula, por lo que la obstrucción del tránsito vehicular se deberá posiblemente a los escombros de los edificios colapsados, como se mostró en la Figura 3.11.

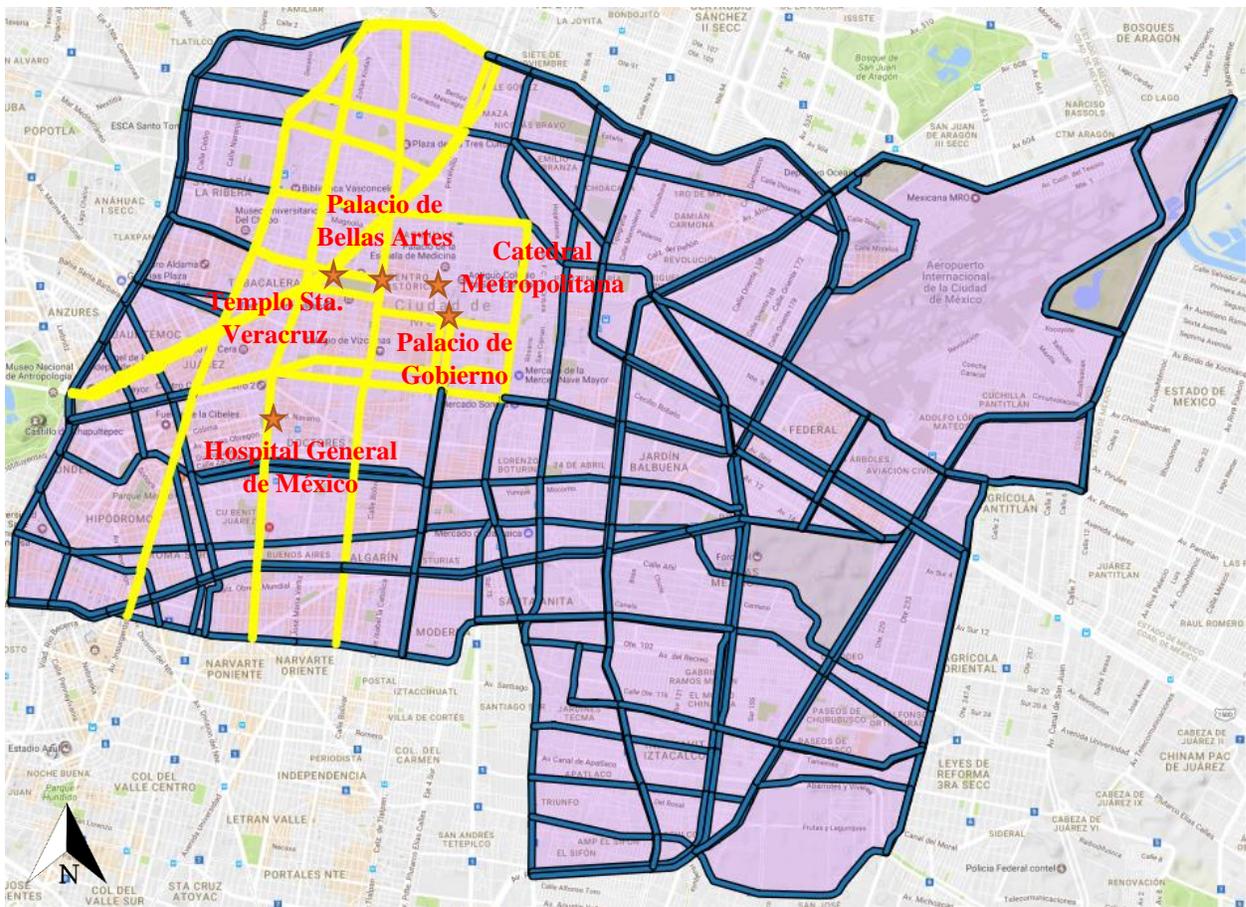


Figura 3.12. Red simplificada con avenidas bloqueadas (red amarilla)

En la siguiente tabla se enlistan las avenidas bloqueadas de la red simplificada, cabe señalar que los mayores daños se concentran en el centro de la Ciudad de México.



Tabla 3.10 Avenidas bloqueadas

<b>Nombre</b>	<b>Longitud (Km)</b>
Av. Chapultepec	1.08
Dr. Río de la Loza	2.13
Fray Servando Teresa	0.16
Arcos de Belem	1.34
José María Izazaga	1.02
San Pablo	0.87
Reforma	7.54
José Antonio Alzate	1.61
Ricardo Flores Magón	2.06
Manuel González	2.08
Guerrero	2.88
Rosales	0.30
Insurgentes	8.67
Bucareli	1.11
Cuauhtémoc	3.50
Hidalgo	1.70
Av. Juárez	0.98
Lázaro Cárdenas	8.27
Vidal Alcocer	1.35
Anillo de Circunvalación	0.89
Héroe de Granadita	1.76
Pino Suárez	0.91
20 de noviembre	0.92
Corregidora	0.78
16 de septiembre	0.83
Circuito interior	1.82



### 3.7 Estimación de la resiliencia sísmica

Hazus (1999) propone una serie de curvas de restauración de infraestructura estratégica, consistentes con los estados de daño definidos en el capítulo anterior. Estas curvas relacionan el tiempo, en días de recuperación, con un porcentaje de funcionalidad. En la Tabla 3.11 se mencionan las curvas que fueron utilizadas para la estimación de la resiliencia.

Tabla 3.11 Curvas de restauración

<b>Infraestructura</b>	<b>Referencia</b>
Vías urbanas	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)
Vías ferroviarias	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)
Pistas de aterrizaje	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)
Túneles	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)
Puentes	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)

#### 3.7.1 Estimación de la resiliencia para vías urbanas

Con la curva de restauración propuesta por Hazus (1999), procedemos a calcular la funcionalidad esperada,  $Q(t)$ , como se indicó en la ec.2.8.

Primeramente, obtuvimos los valores de probabilidad de los posibles estados de daño para diferentes PGA, como se indica en la Tabla 3.12.



Tabla 3.12 Coeficientes de daño, siendo uno igual al 100% de probabilidad de daño

PGA (g)	Daño menor	Daño moderado	Daño extenso	Daño completo
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
0.10	0.000	0.003	0.000	0.000
0.20	0.003	0.003	0.003	0.003
0.30	0.024	0.007	0.003	0.003
0.40	0.090	0.017	0.003	0.003
0.50	0.220	0.053	0.014	0.014
0.60	0.398	0.120	0.031	0.031
0.70	0.587	0.230	0.066	0.066
0.80	0.730	0.352	0.100	0.100
0.90	0.835	0.510	0.167	0.167
1.00	0.901	0.620	0.255	0.255
1.10	0.936	0.725	0.345	0.345
1.20	0.970	0.800	0.442	0.442
1.30	0.977	0.862	0.550	0.550
1.40	0.984	0.900	0.624	0.624
1.50	0.990	0.920	0.714	0.714

Después se calcula la probabilidad de no alcanzar o superar ese estado de daño, es decir, si la probabilidad de tener un daño menor con un PGA de 0.5 es de 22%, la probabilidad de no exceder ese daño es de 78%. En la Tabla 3.13 se muestran los resultados.

Tabla 3.13 Coeficientes de no alcanzar cierto estado de daño

PGA (g)	Daño menor	Daño moderado	Daño extenso	Daño completo
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000
0.10	1.000	0.997	1.000	1.000
0.20	0.997	0.997	0.997	0.997
0.30	0.976	0.993	0.997	0.997
0.40	0.910	0.983	0.997	0.997
0.50	0.780	0.947	0.986	0.986
0.60	0.602	0.880	0.969	0.969
0.70	0.413	0.770	0.934	0.934
0.80	0.270	0.648	0.900	0.900
0.90	0.165	0.490	0.833	0.833
1.00	0.099	0.380	0.745	0.745
1.10	0.064	0.275	0.655	0.655
1.20	0.030	0.200	0.558	0.558
1.30	0.023	0.138	0.450	0.450
1.40	0.016	0.100	0.376	0.376
1.50	0.010	0.080	0.286	0.286



Aplicamos la ec.2.8 para obtener la probabilidad condicional de estar en el estado de daño  $d$ , dado el escenario de evento con  $IM=s$ , calculado con el análisis de las curvas de fragilidad, es decir, multiplicamos los coeficientes de no alcanzar cierto estado de daño por la funcionalidad de la estructura, para este ejemplo es la funcionalidad de las vialidades según cada instante  $t$ , dicha funcionalidad es obtenida de la curva de restauración.

Tabla 3.14 Probabilidad condicional para daños menores

Días	Funcionalidad	Menor														
		PGA=0.1	PGA=0.2	PGA=0.3	PGA=0.4	PGA=0.5	PGA=0.6	PGA=0.7	PGA=0.8	PGA=0.9	PGA=1.0	PGA=1.1	PGA=1.2	PGA=1.3	PGA=1.4	PGA=1.5
1.00	0.99	0.987	0.984	0.963	0.898	0.770	0.594	0.408	0.266	0.163	0.098	0.063	0.029	0.023	0.016	0.009
1.05	0.99	0.989	0.986	0.965	0.900	0.771	0.595	0.409	0.267	0.163	0.098	0.064	0.029	0.023	0.016	0.010
1.15	0.99	0.993	0.990	0.969	0.904	0.775	0.598	0.410	0.268	0.164	0.098	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
1.25	0.99	0.993	0.990	0.969	0.904	0.775	0.598	0.410	0.268	0.164	0.098	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
1.36	1.00	0.996	0.993	0.972	0.906	0.777	0.599	0.411	0.269	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
1.46	1.00	0.996	0.993	0.972	0.906	0.777	0.599	0.411	0.269	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
1.61	1.00	0.996	0.993	0.972	0.906	0.777	0.599	0.411	0.269	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
1.74	1.00	0.998	0.995	0.974	0.908	0.778	0.601	0.412	0.269	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
1.87	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
1.97	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
2.17	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
2.38	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
2.56	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
2.73	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
2.90	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
3.06	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
3.26	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
3.54	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
3.92	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
4.20	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
4.5	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
4.92	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
5.41	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
6.17	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
6.79	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
7.78	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
8.74	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
10.20	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
11.70	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
12.80	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
14.20	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
16.00	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
17.70	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
19.70	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
21.20	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
22.70	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
24.30	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
26.60	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
27.70	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
29.7	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
31.80	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
33.80	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
35.70	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
38.50	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
41.50	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
45.70	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
50.00	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
56.20	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
64.00	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010
72.80	1.00	1.000	0.997	0.976	0.910	0.780	0.602	0.413	0.270	0.165	0.099	0.064	0.030	0.023	0.016	0.010

Se realizó lo mismo para el estado de daño moderado, extenso y completo, es decir, se tuvieron tres tablas más con la misma estructura, solo que con resultados diferentes.

Para obtener la probabilidad de ocurrencia calculada por un análisis de riesgo sísmico probabilístico, se relacionan los dos tipos de sismos (normal y de subducción) para generar una línea de tendencia y obtener la probabilidad de ocurrencia.



Tabla 3.15 Probabilidad de ocurrencia para las cuatro  $T_r$

	$T_r$ (años)	$\lambda = 1/T_r$	PGA (g)
<b>Normal</b>	125	0.008	0.07645
	250	0.004	0.10550
	475	0.002105263	0.14067
	2475	0.00040404	0.25994
	$T_r$ (años)	$\lambda = 1/T_r$	PGA
<b>Subduccion</b>	125	0.008	0.04383
	250	0.004	0.05301
	475	0.002105263	0.06251
	2475	0.00040404	0.08930

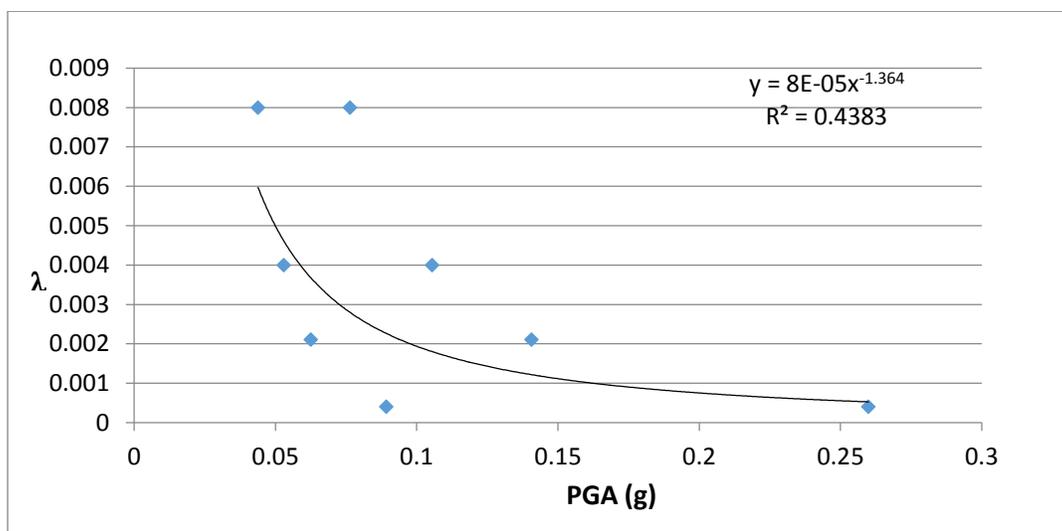
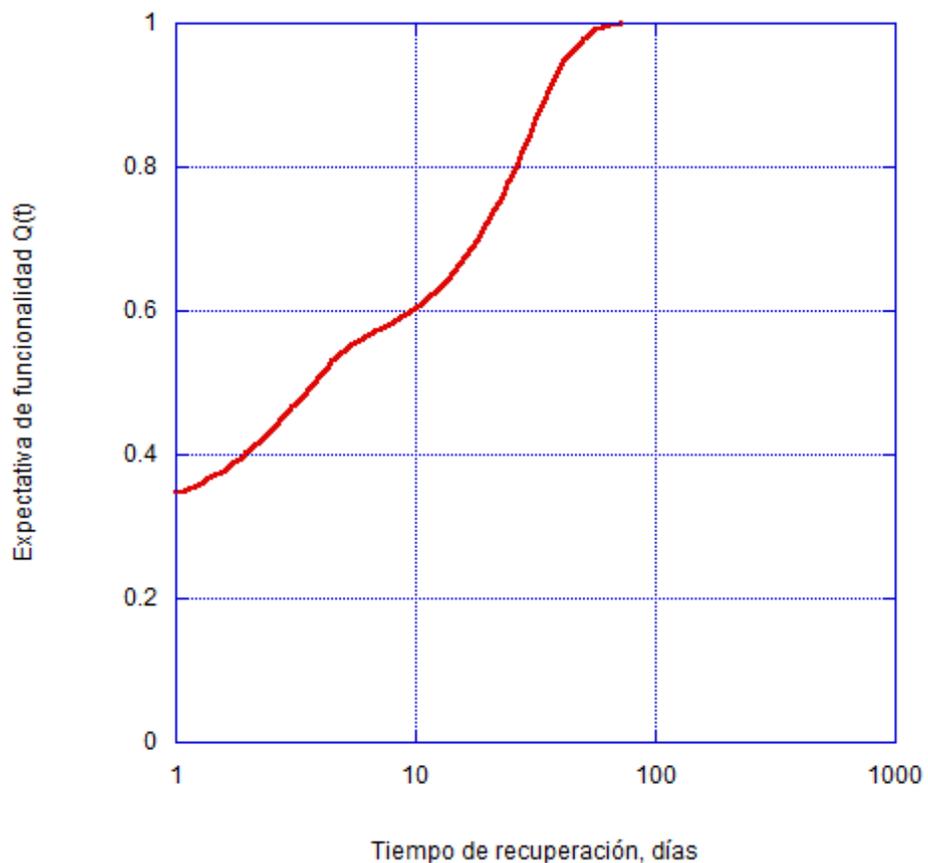


Figura 3.13. Línea de tendencia que relaciona ambos sismos

Tabla 3.16 Probabilidad de ocurrencia tomando en cuenta la línea de tendencia

PGA (g)	OCURENCIA
0.1	0.00185
0.2	0.00072
0.3	0.00041
0.4	0.00028
0.5	0.00021
0.6	0.00016
0.7	0.00013
0.8	0.00011
0.9	0.00009
1.0	0.00008
1.1	0.00007
1.2	0.00006
1.3	0.00006
1.4	0.00005
1.5	0.00005





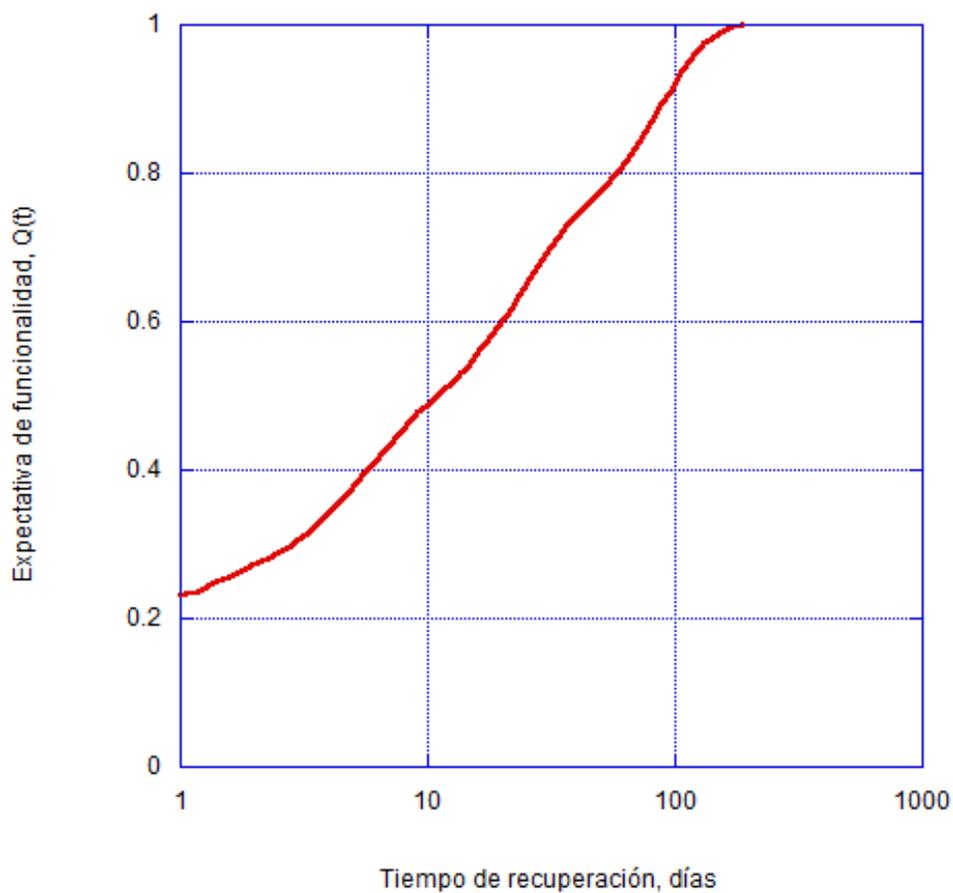
*Figura 3.14. Funcionalidad para vías urbanas*

Con la obtención de la gráfica  $Q(t)$ , aplicamos la ec.2.7 para calcular el índice de resiliencia, dando como resultado un índice 0.89.



### 3.7.2 Estimación de la resiliencia para vías ferroviarias

Se hizo una estimación de la resiliencia para vías ferroviarias aplicando el mismo procedimiento que se llevó a cabo para las vías urbanas, obtenido los siguientes resultados.



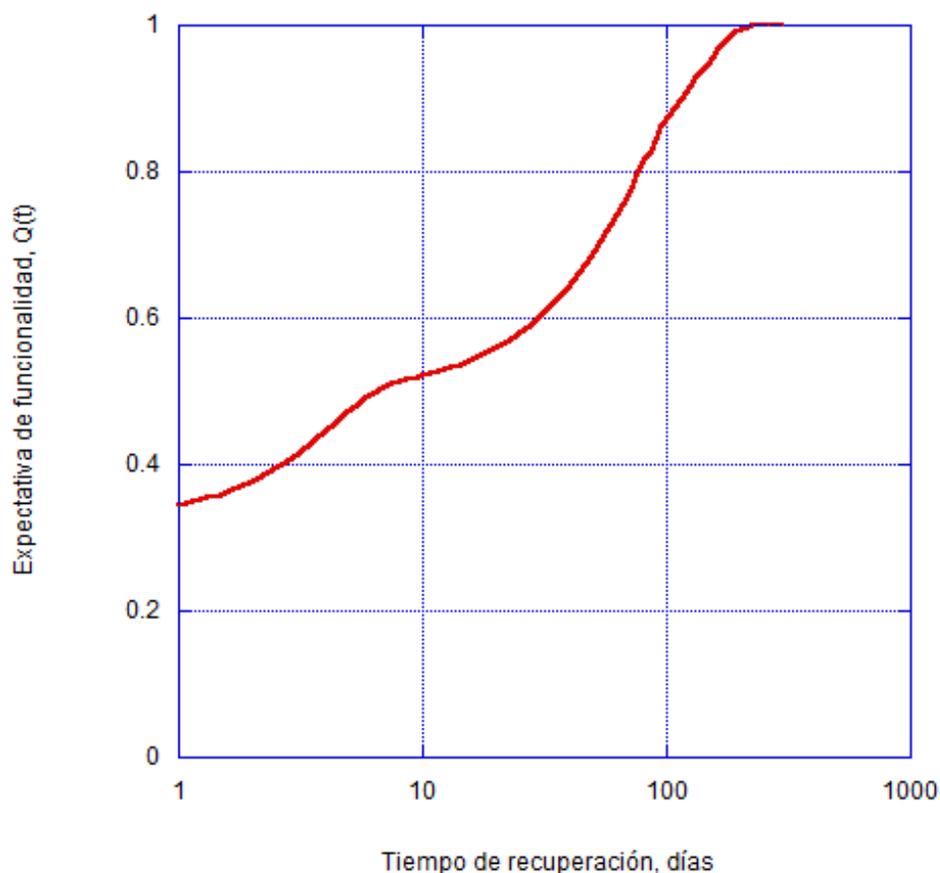
*Figura 3.15. Funcionalidad para vías ferroviarias*

Con la obtención de la gráfica  $Q(t)$ , aplicamos la ec.2.7 para calcular el índice de resiliencia, dando como resultado un índice 0.84.



### 3.7.3 Estimación de la resiliencia para pistas de aterrizaje

Se hizo una estimación de la resiliencia para pistas de aterrizaje aplicando el mismo procedimiento que se llevó a cabo para los casos anteriores, obtenido los siguientes resultados.



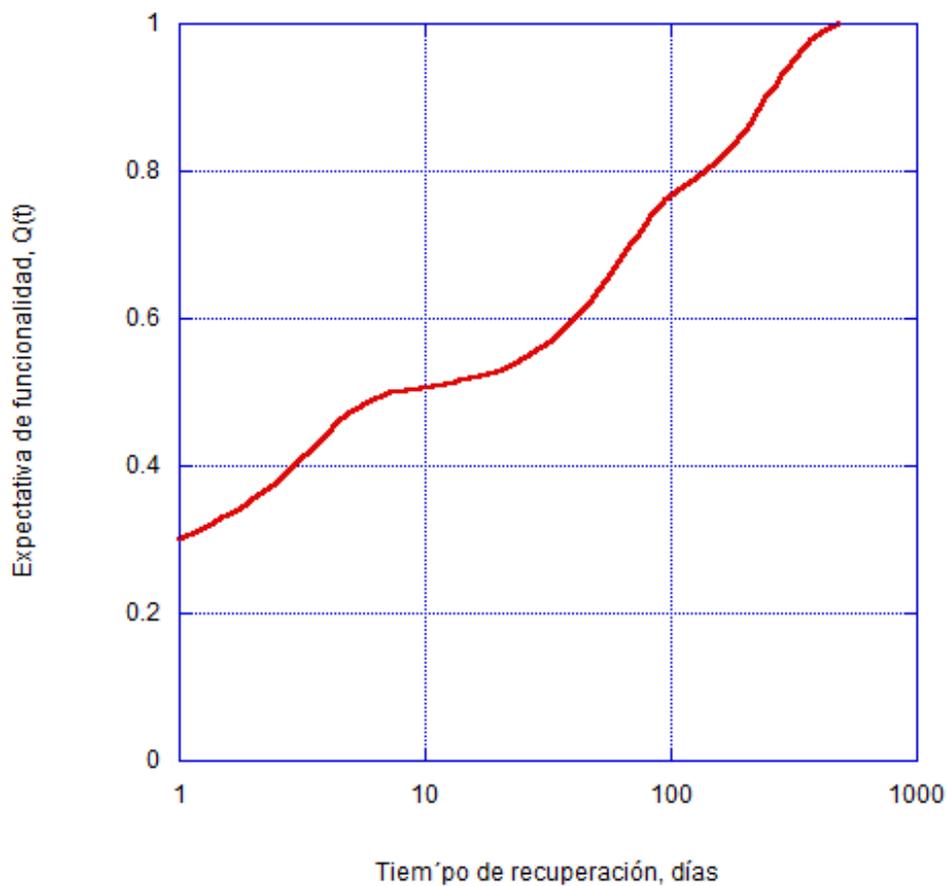
*Figura 3.16. Funcionalidad para pistas de aterrizaje*

Con la obtención de la gráfica  $Q(t)$ , aplicamos la ec.2.7 para calcular el índice de resiliencia, dando como resultado un índice 0.87.



### 3.7.4 Estimación de la resiliencia para túneles

Se hizo una estimación de la resiliencia para túneles aplicando el mismo procedimiento que se llevó a cabo para los casos anteriores, obtenido los siguientes resultados.



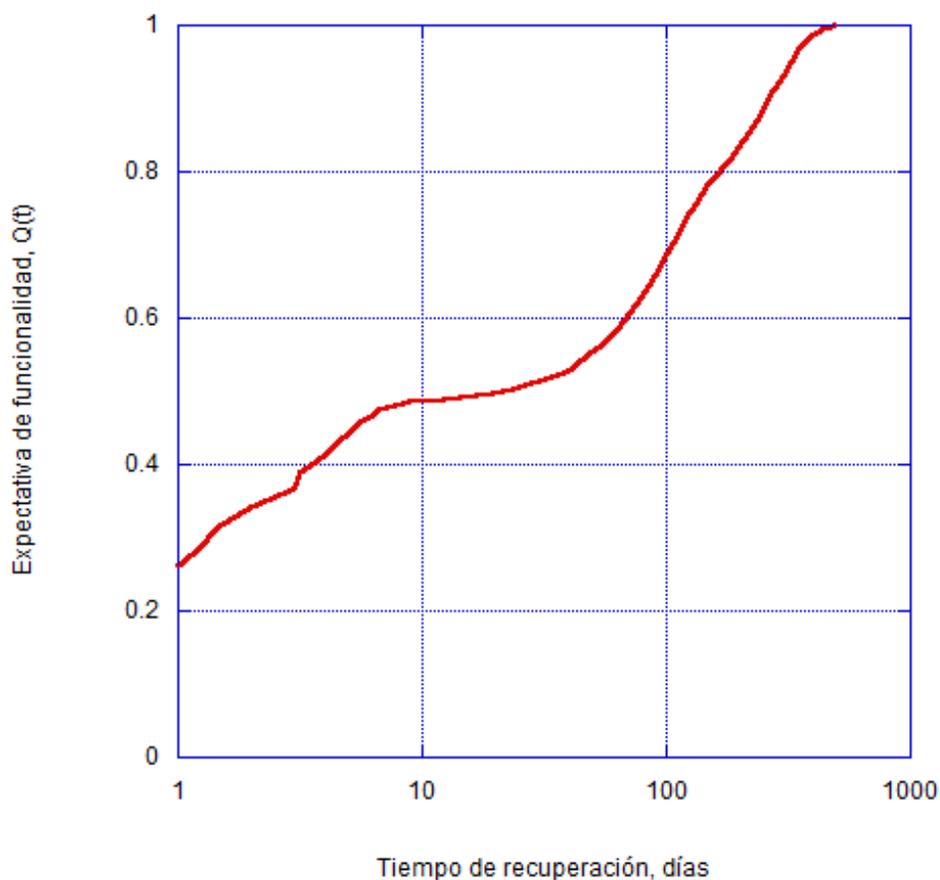
*Figura 3.17. Funcionalidad para túneles*

Con la obtención de la gráfica  $Q(t)$ , aplicamos la ec.2.7 para calcular el índice de resiliencia, dando como resultado un índice 0.85.



### 3.7.5 Estimación de la resiliencia para puentes

Se hizo una estimación de la resiliencia para puentes aplicando el mismo procedimiento que se llevó a cabo para los casos anteriores, obtenido los siguientes resultados.



*Figura 3.18. Funcionalidad para puentes*

Con la obtención de la gráfica  $Q(t)$ , aplicamos la ec.2.7 para calcular el índice de resiliencia, dando como resultado un índice 0.82.



### 3.8 Curvas de fragilidad específicas para la Ciudad de México

Se encontraron una serie de curvas de fragilidad propias para la Ciudad de México las cuales se muestran en la Tabla 3.18, estas son representativas para viviendas de mampostería, puentes, teatros y auditorios.

En la Tabla 3.18 se presentan las curvas asignadas, de igual manera se relaciona el parámetro de intensidad sísmica con la probabilidad de alcanzar o superar un nivel de daño (leve, moderado, extenso y colapso).

Tabla 3.18. Curvas de fragilidad propias de la Ciudad de México

Infraestructura	Referencia	Medida de Intensidad
Viviendas de mampostería	(Cázares J., 2013)	$S_a$
Puentes	(Mayoral <i>et al.</i> , 2016)	PGA
Auditorios	(Diario Oficial de la Federación. 2012)	PGA
Teatros	(Diario Oficial de la Federación. 2012)	PGA

Con el espectro de respuesta obtenido anteriormente tanto para un sismo normal como de subducción, se procede a realizar el análisis de vulnerabilidad para calcular la probabilidad de daño.

Tabla 3.19 Probabilidad de falla presentando daños leves

Infraestructura	Probabilidad de falla (%)				Probabilidad de falla (%)			
	Sismo de subducción				Sismo normal			
	(T <sub>r</sub> )				(T <sub>r</sub> )			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Viviendas de mampostería	20	30	45	65	5	7	10	40
Puentes	50	60	70	90	20	40	50	80
Auditorios y teatros	100	100	100	100	50	82	100	100



Tabla 3.20 Probabilidad de falla presentando daños moderados

Infraestructura	Probabilidad de falla (%)				Probabilidad de falla (%)			
	Sismo de subducción				Sismo normal			
	(T <sub>r</sub> )				(T <sub>r</sub> )			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Viviendas de mampostería	20	28	40	63	5	7	9	35
Puentes	12	16	30	60	3	8	12	40
Auditorios y teatros	60	70	80	98	4	30	60	95

Tabla 3.21 Probabilidad de falla presentando daños extensos

Infraestructura	Probabilidad de falla (%)				Probabilidad de falla (%)			
	Sismo de subducción				Sismo normal			
	(T <sub>r</sub> )				(T <sub>r</sub> )			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Viviendas de mampostería	10	20	35	58	5	5	7	28
Puentes	8	10	16	40	1	4	8	20
Auditorios y teatros	10	18	30	75	0	2	10	60



Tabla 3.22 Probabilidad de falla presentando daños completos

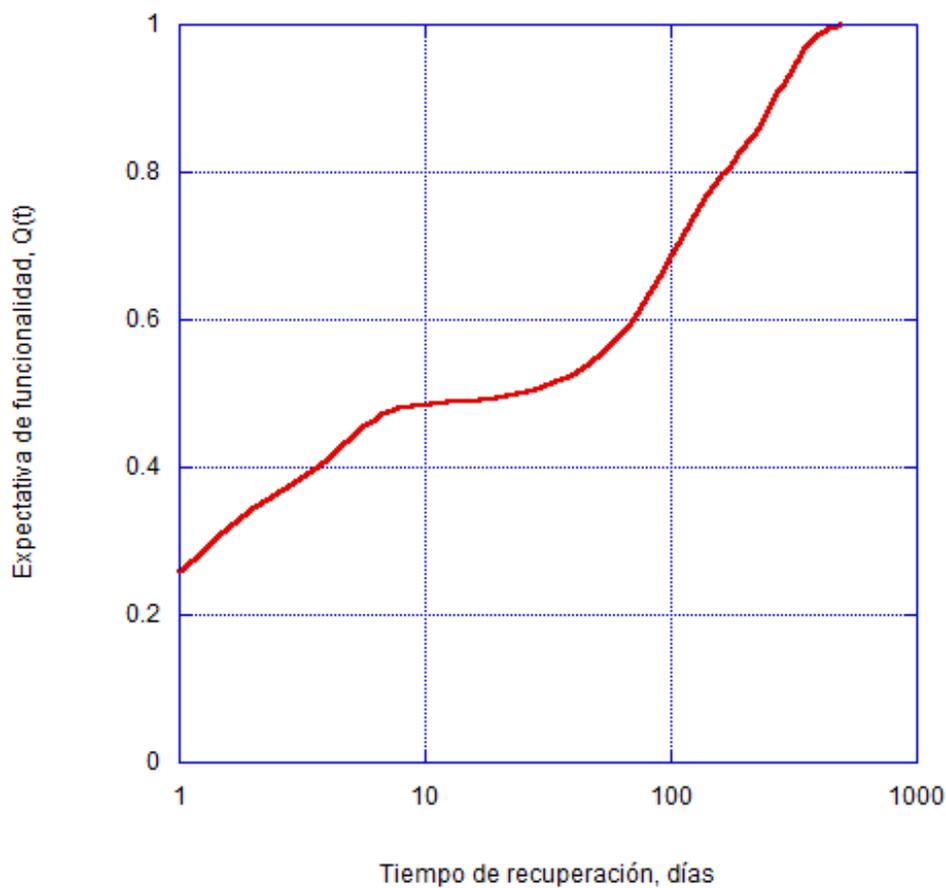
Infraestructura	Probabilidad de falla (%)				Probabilidad de falla (%)			
	Sismo de subducción				Sismo normal			
	(T <sub>r</sub> )				(T <sub>r</sub> )			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Viviendas de mampostería	10	20	35	58	5	5	7	28
Puentes	2	6	10	30	0	0	2	14
Auditorios y teatros	2	8	12	40	0	0	2	20

Para hacer el cálculo de la probabilidad de falla para viviendas de mampostería, dado que la medida de intensidad de la curva de fragilidad está en  $S_a$ , se tomaron las  $S_a$  máximas de todo el periodo de vibración del espectro de respuesta, el cual oscilan entre los (2 y 2.4s). En la Tabla 3.23 se resumen las  $S_a$  usadas para los diferentes estados de daño.

Tabla 3.23 Aceleraciones espectrales,  $S_a$ , utilizadas para viviendas de mampostería

(T <sub>r</sub> )	Sismo de subducción				Sismo normal			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
T (s)	2.2	2	2.2	2.4	0.4	2	2.2	2.2
S <sub>a</sub> (g)	0.28	0.36	0.47	0.81	0.57	0.69	0.85	1.15

Se realizó la estimación de la resiliencia sísmica para puentes, con la curva de fragilidad propuesta por Mayoral *et al.*, 2016, donde las PGA son diferentes en comparación a la curva propuesta por Hazus (1999) para los diferentes estados de daño. Se siguió el mismo procedimiento para obtener la gráfica Q(t) (Figura 3.19).



*Figura 3.19 Funcionalidad para puentes utilizando la curva de fragilidad propuesta por Mayoral et al, 2016*

Con la obtención de la gráfica  $Q(t)$ , aplicamos de la misma manera la ec.2.7 para calcular el índice de resiliencia, dando como resultado un índice 0.81.



## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En las siguientes graficas se resumen las probabilidades de daño obtenidas para los cuatro periodos de retorno, tanto para un sismo normal como para un sismo de subducción.

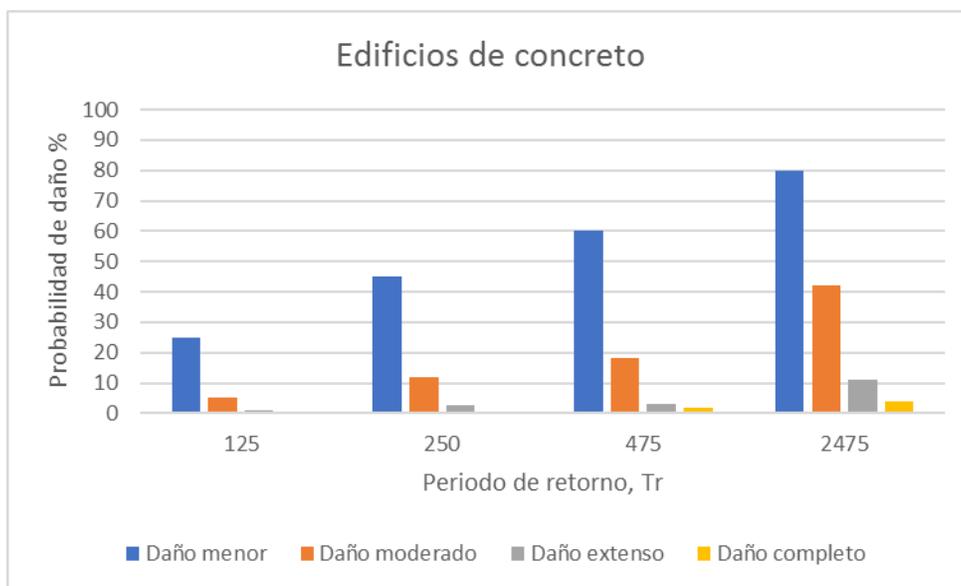


Figura 4.1 Probabilidad de daño para un sismo normal

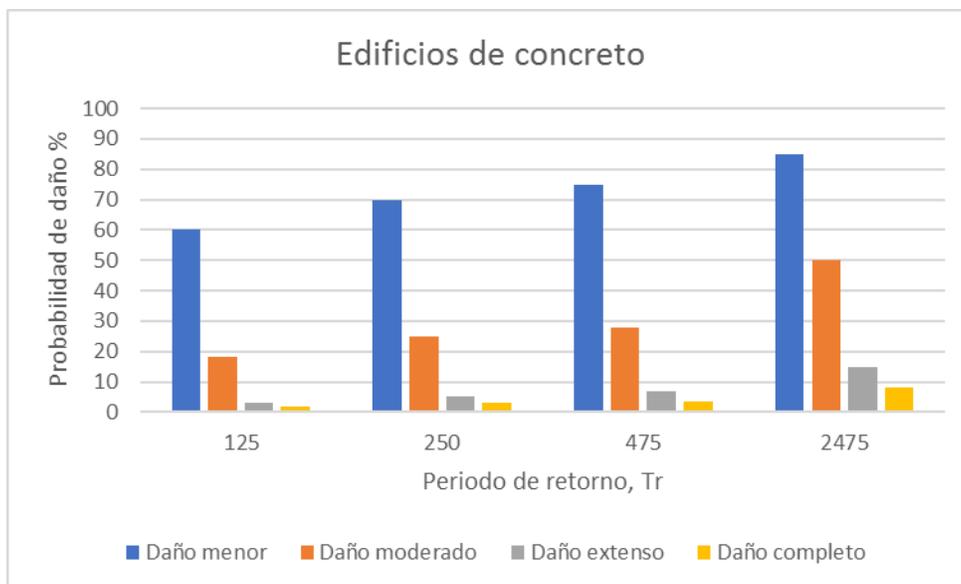


Figura 4.2 Probabilidad de daño para un sismo de subducción

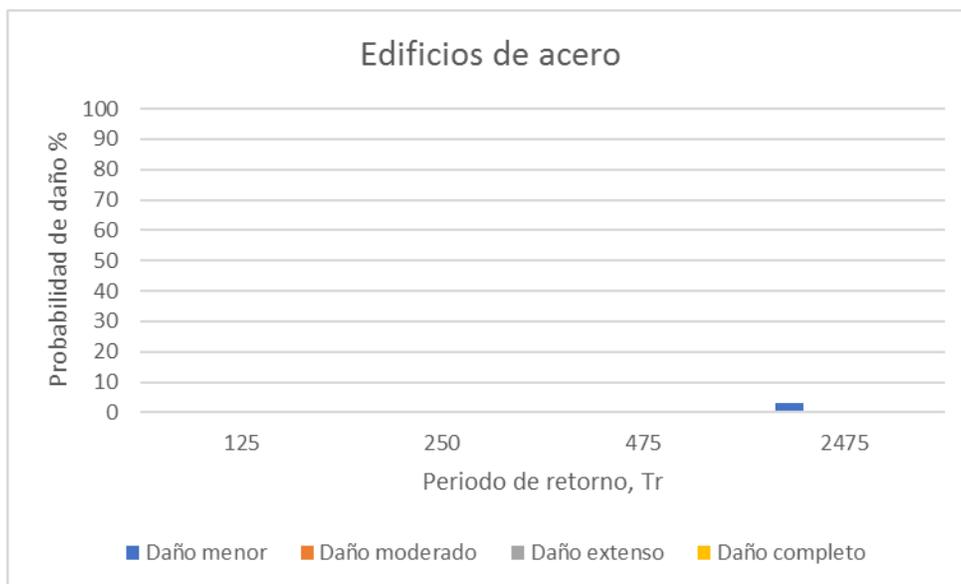


Figura 4.3 Probabilidad de daño para un sismo normal

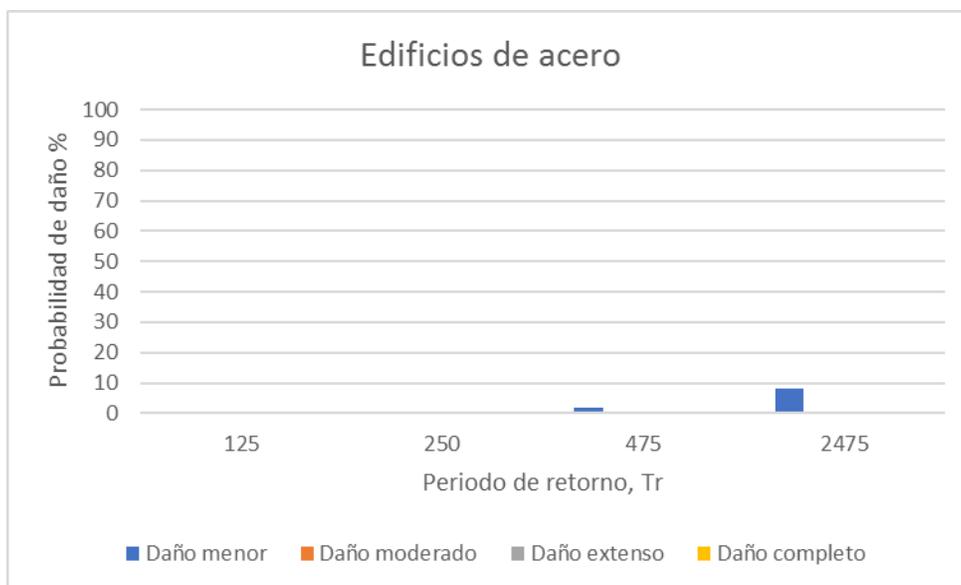


Figura 4.4 Probabilidad de daño para un sismo de subducción

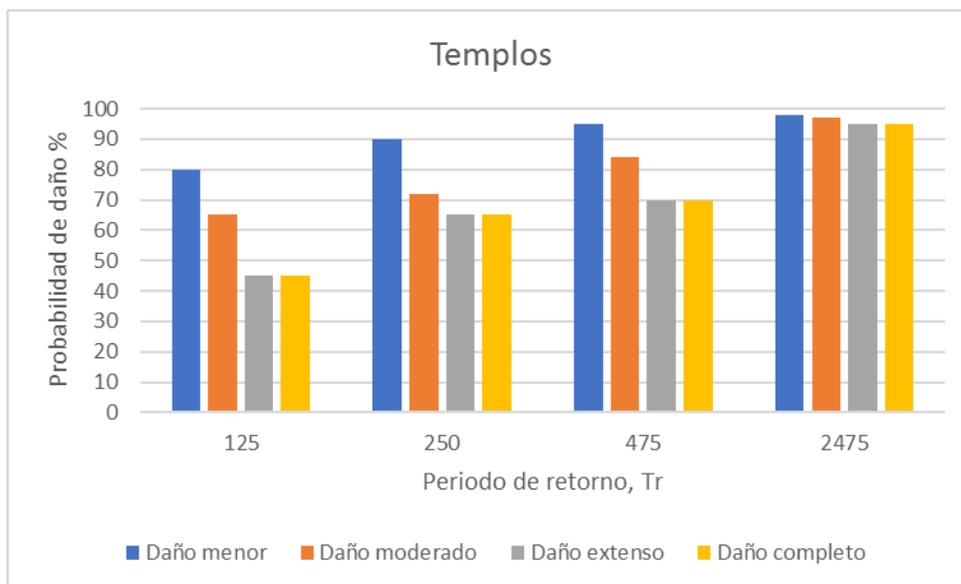


Figura 4.5 Probabilidad de daño para un sismo normal

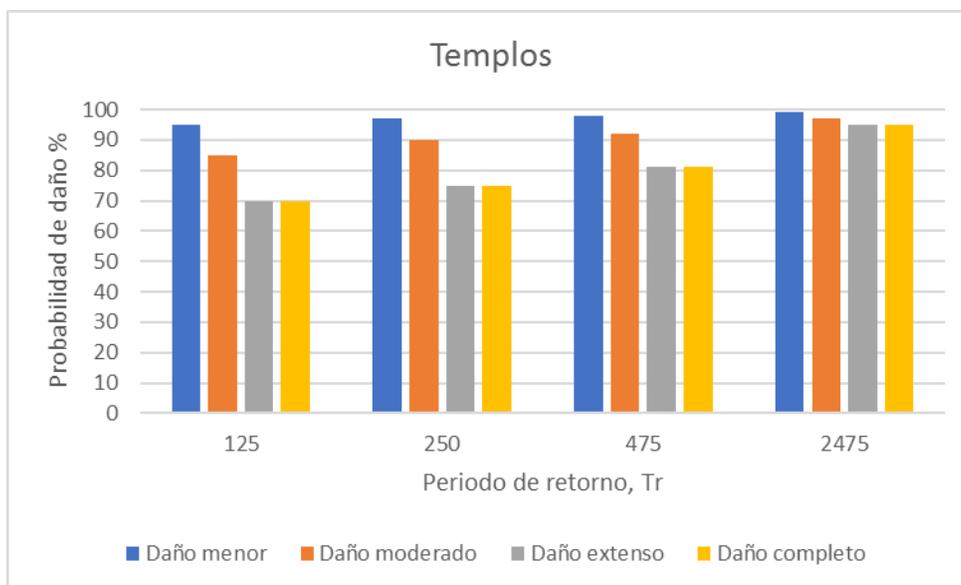


Figura 4.6 Probabilidad de daño para un sismo de subducción

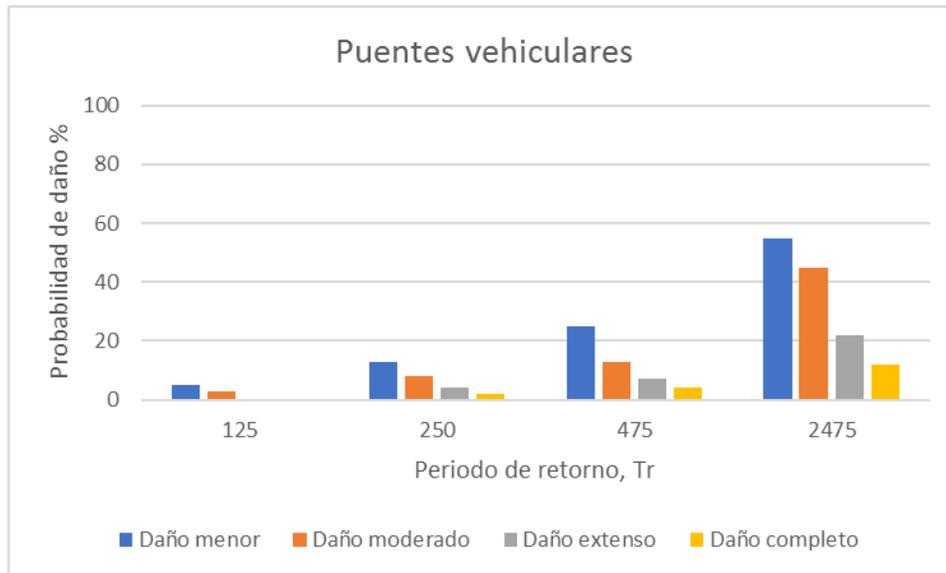


Figura 4.7 Probabilidad de daño para un sismo normal

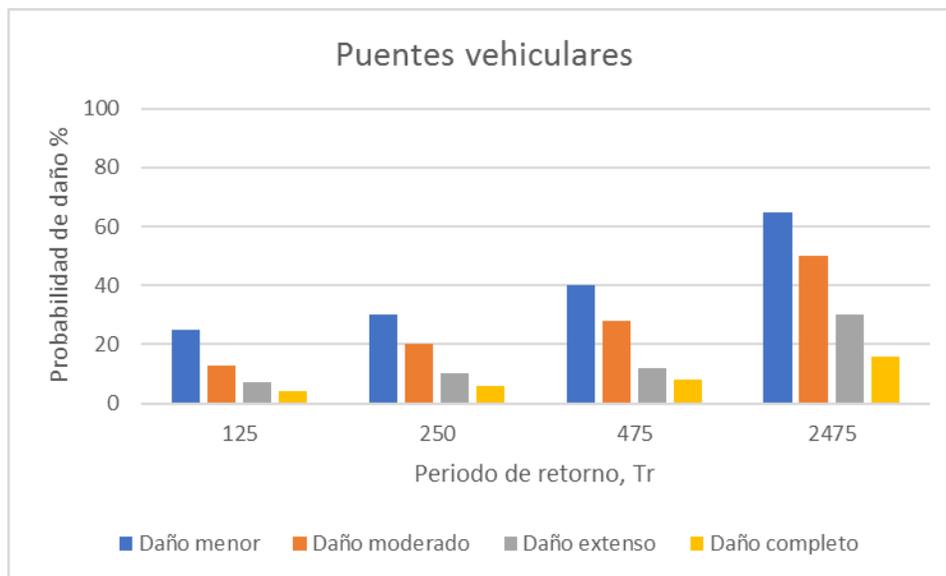


Figura 4.8 Probabilidad de daño para un sismo de subducción

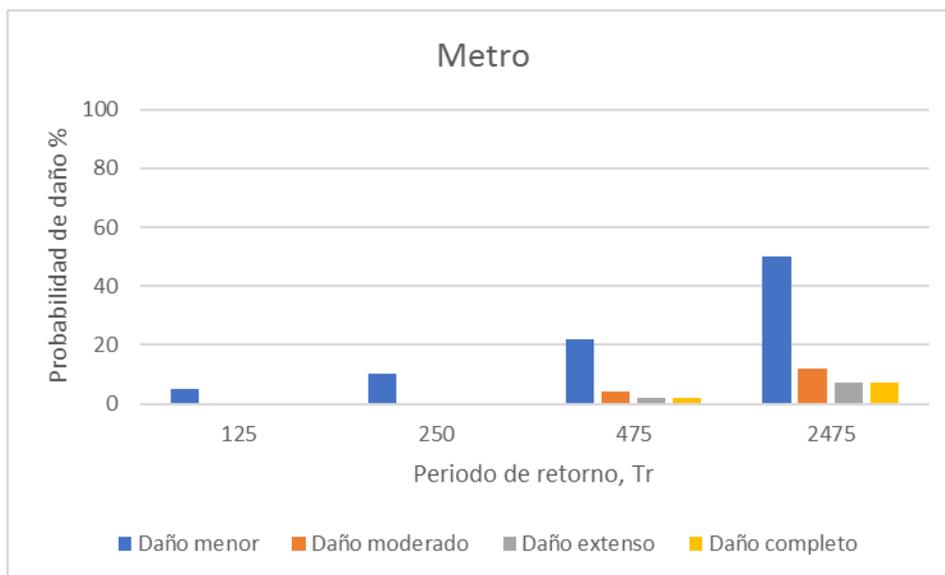


Figura 4.9 Probabilidad de daño para un sismo normal

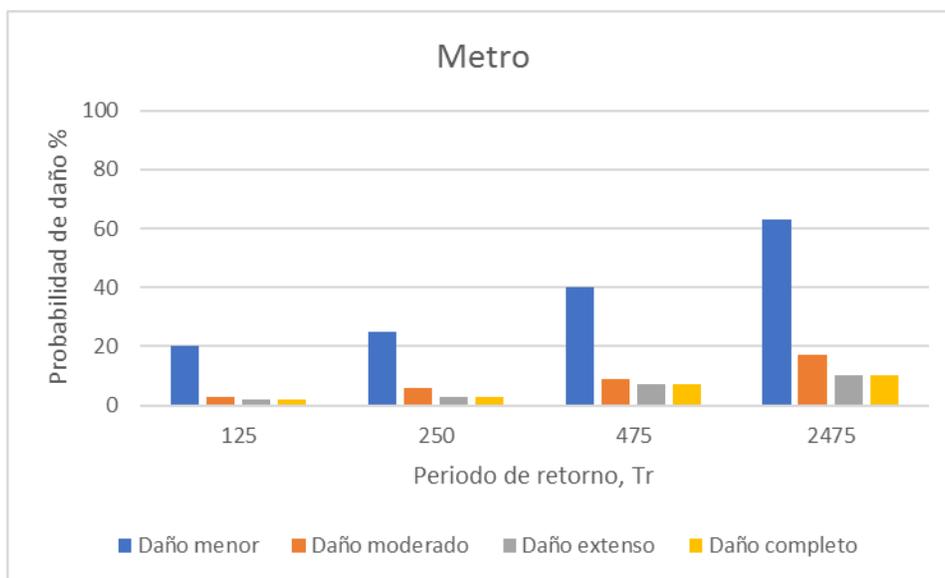


Figura 4.10 Probabilidad de daño para un sismo de subducción

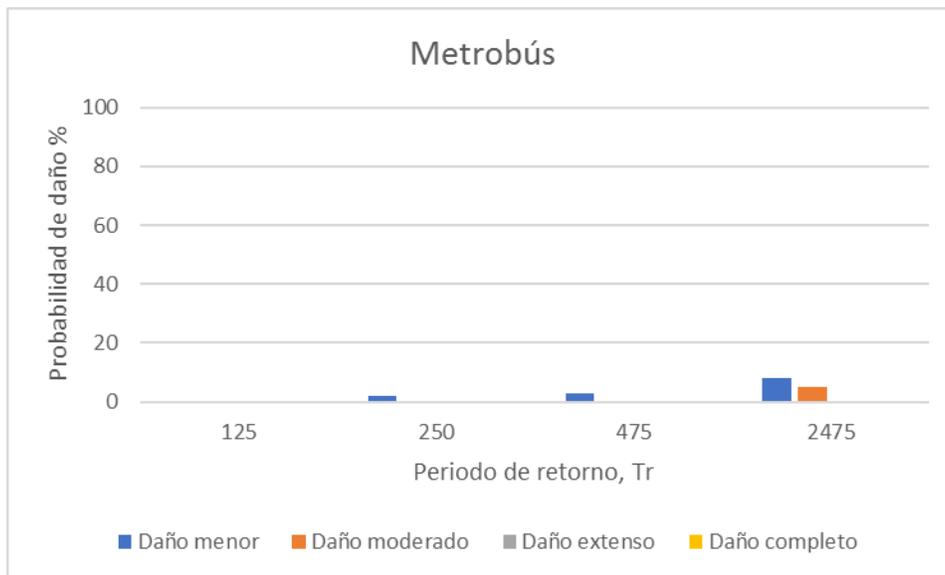


Figura 4.11 Probabilidad de daño para un sismo normal

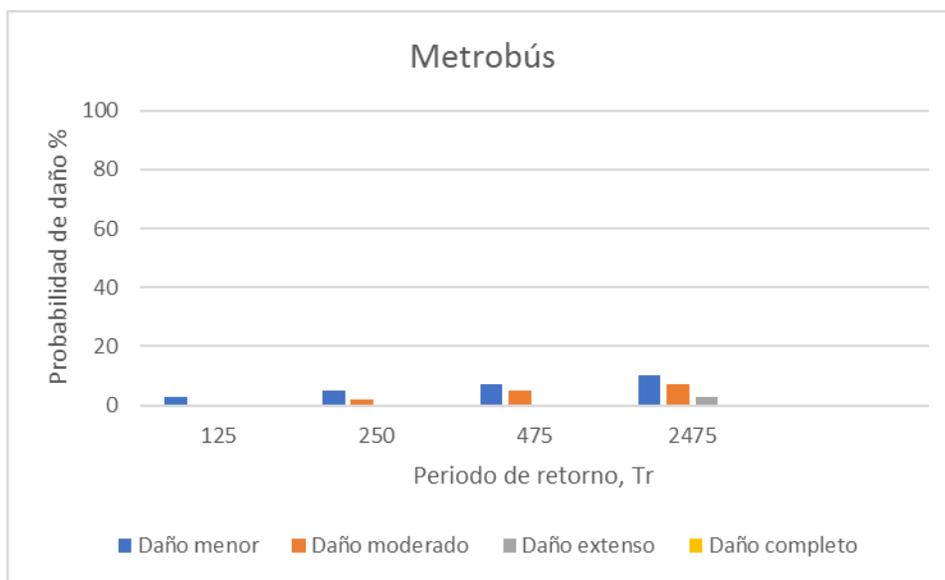


Figura 4.12 Probabilidad de daño para un sismo de subducción

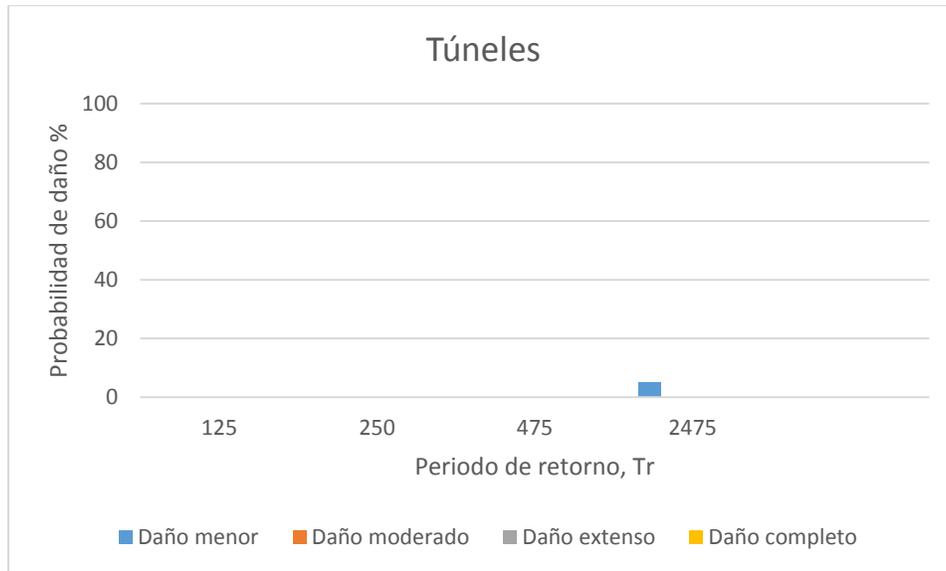


Figura 4.13 Probabilidad de daño para un sismo normal

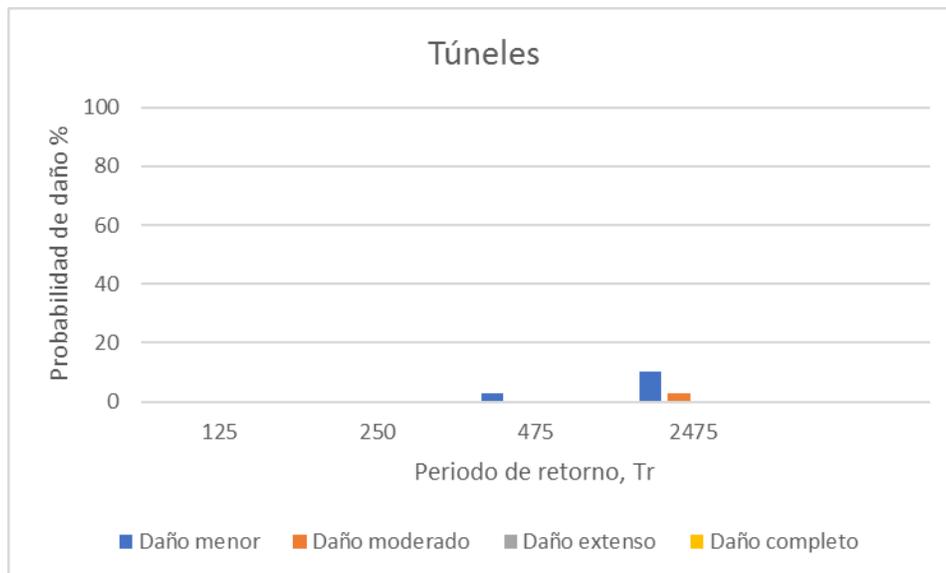


Figura 4.14 Probabilidad de daño para un sismo de subducción

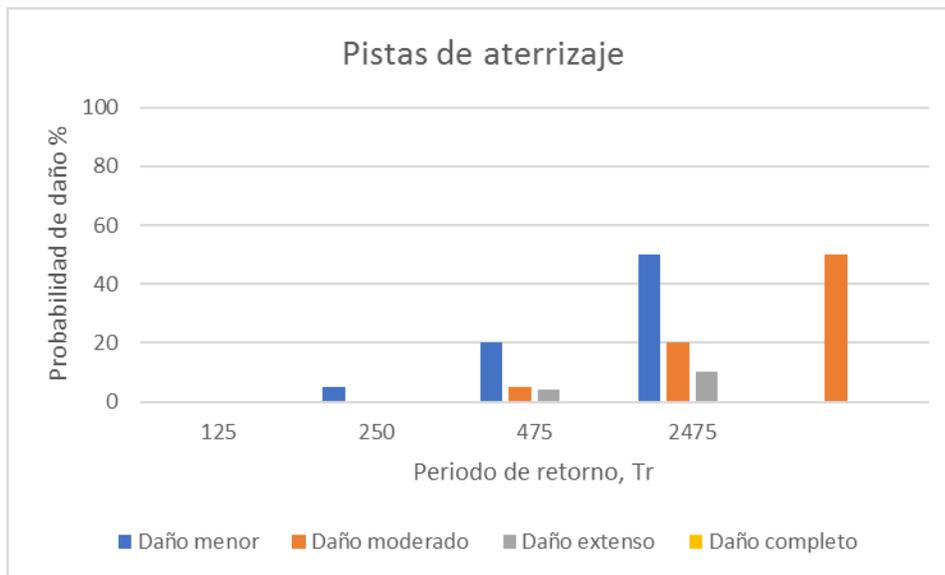


Figura 4.15 Probabilidad de daño para un sismo normal

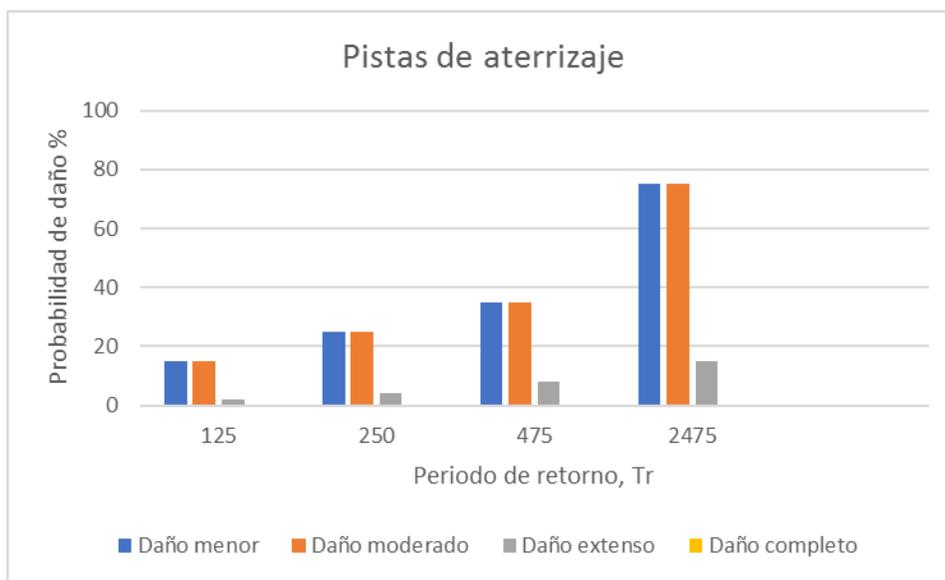


Figura 4.16 Probabilidad de daño para un sismo de subducción

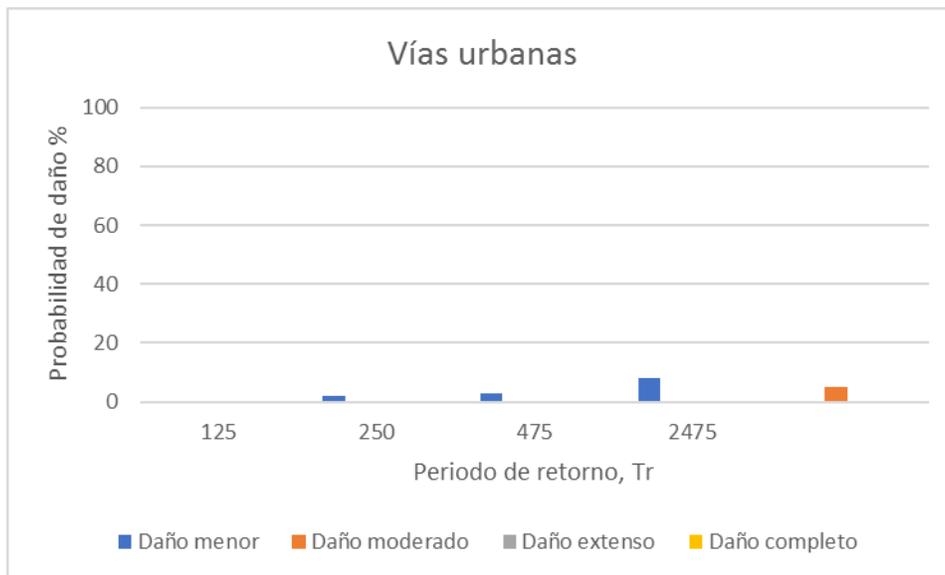


Figura 4.17 Probabilidad de daño para un sismo normal

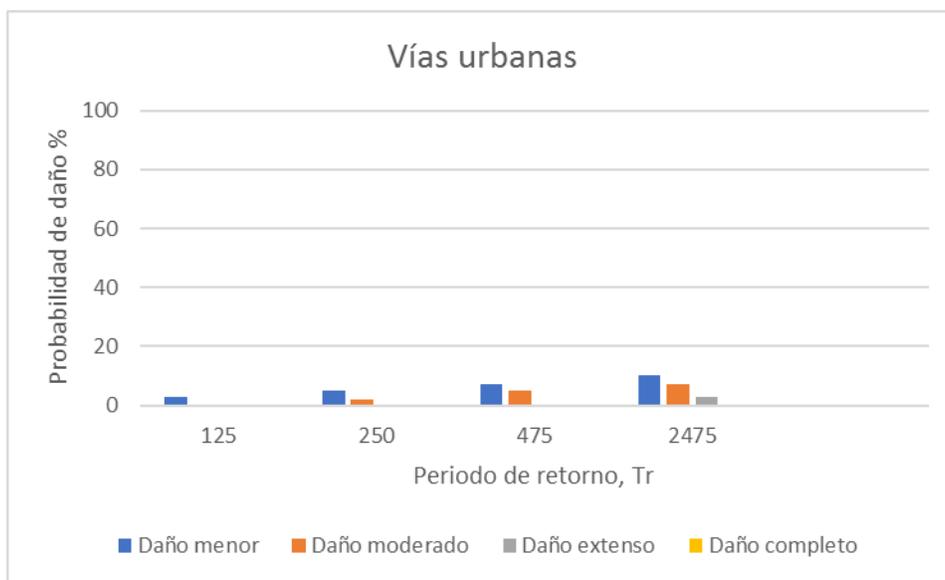


Figura 4.18 Probabilidad de daño para un sismo de subducción

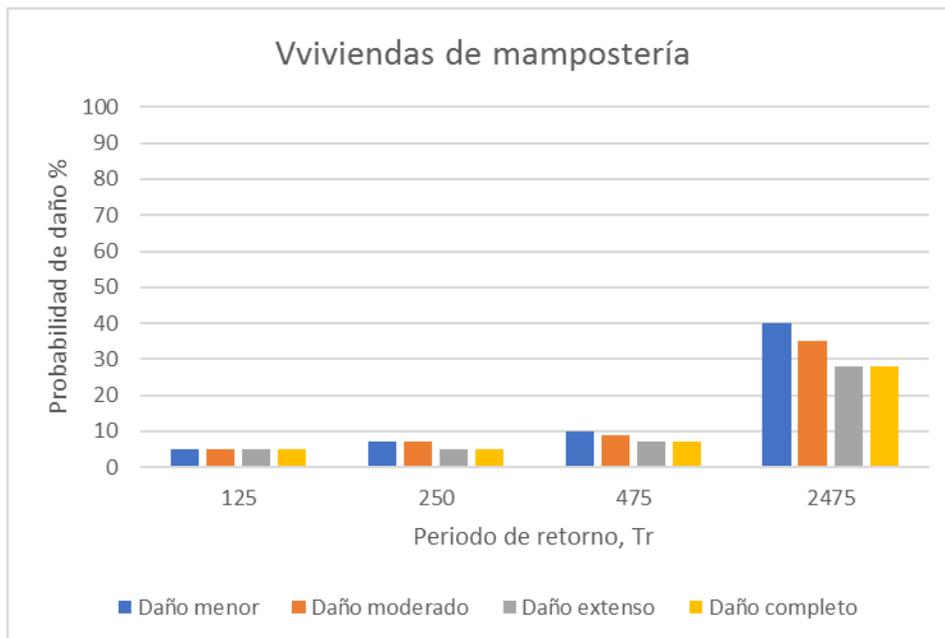


Figura 4.19 Probabilidad de daño para un sismo normal

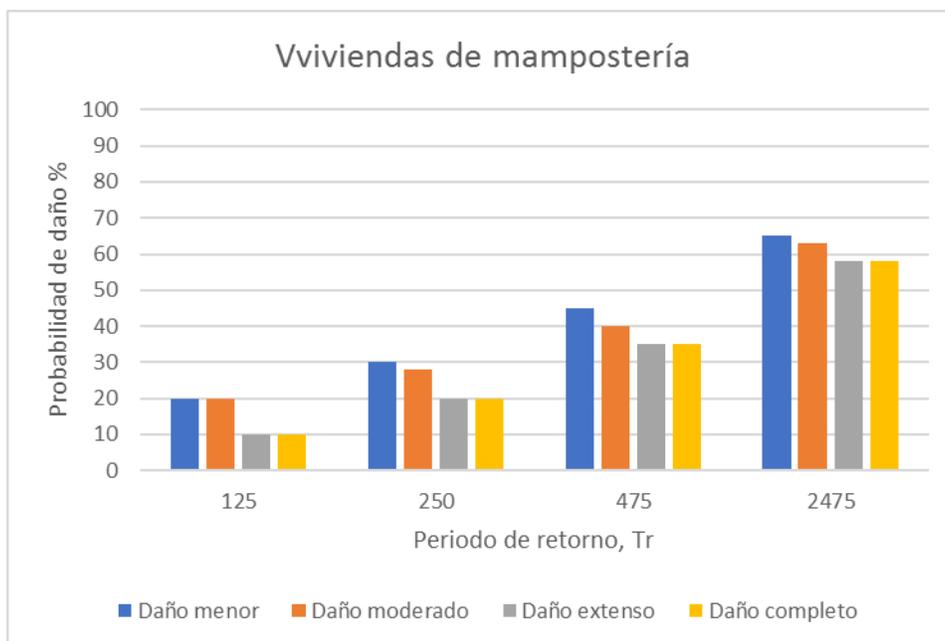


Figura 4.20 Probabilidad de daño para un sismo de subducción

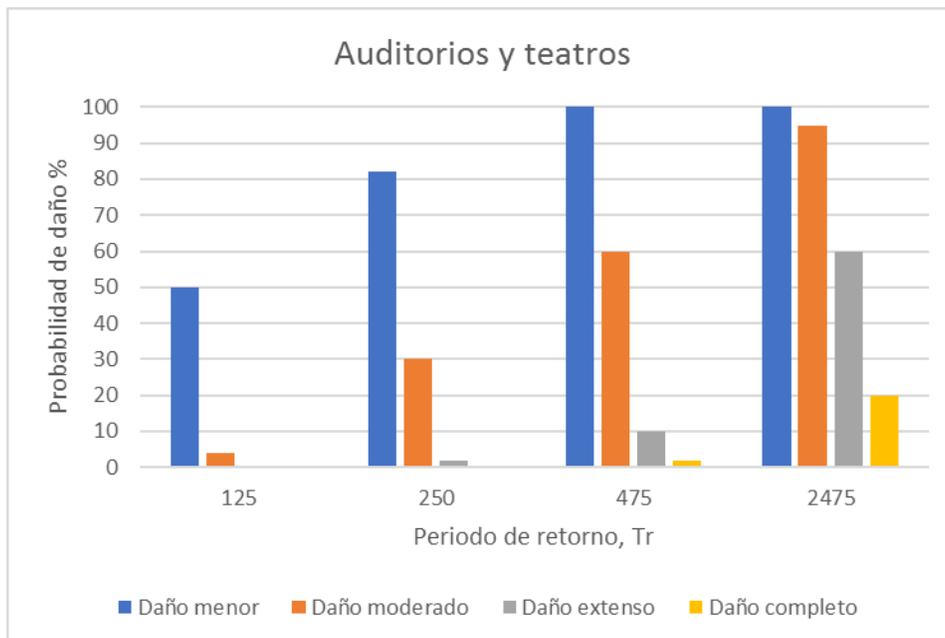


Figura 4.21 Probabilidad de daño para un sismo normal

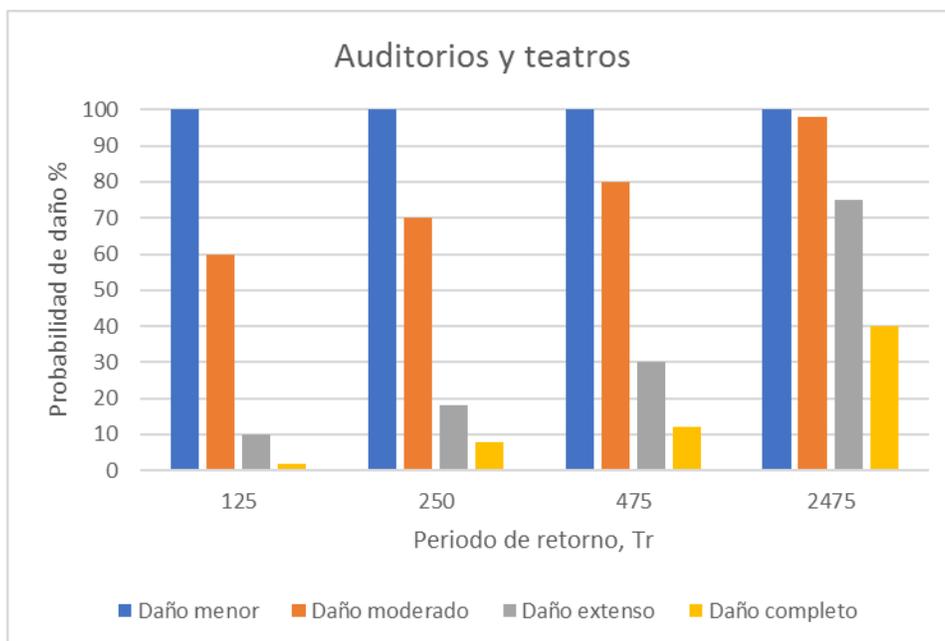


Figura 4.22 Probabilidad de daño para un sismo de subducción

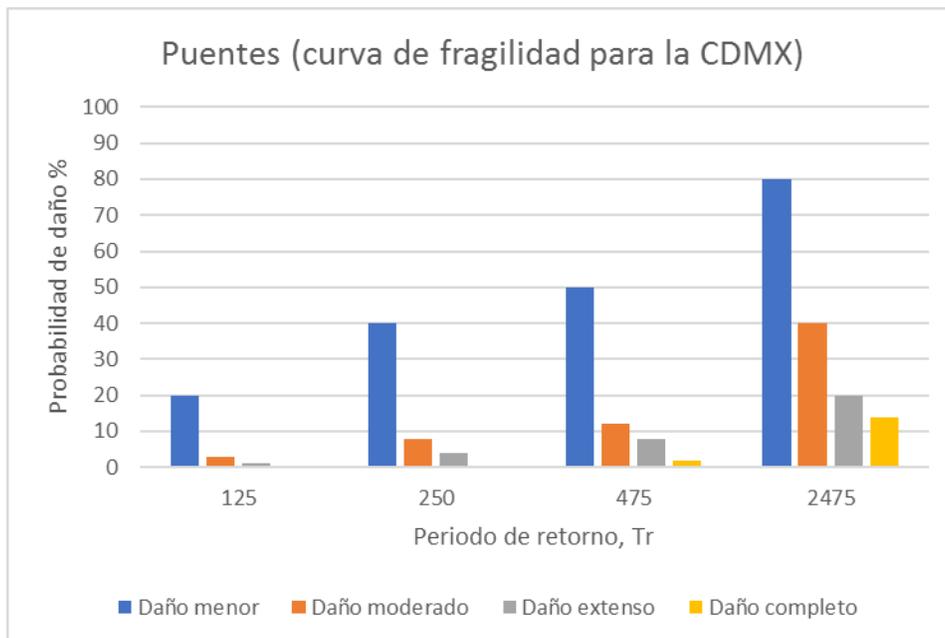


Figura 4.23 Probabilidad de daño para un sismo normal

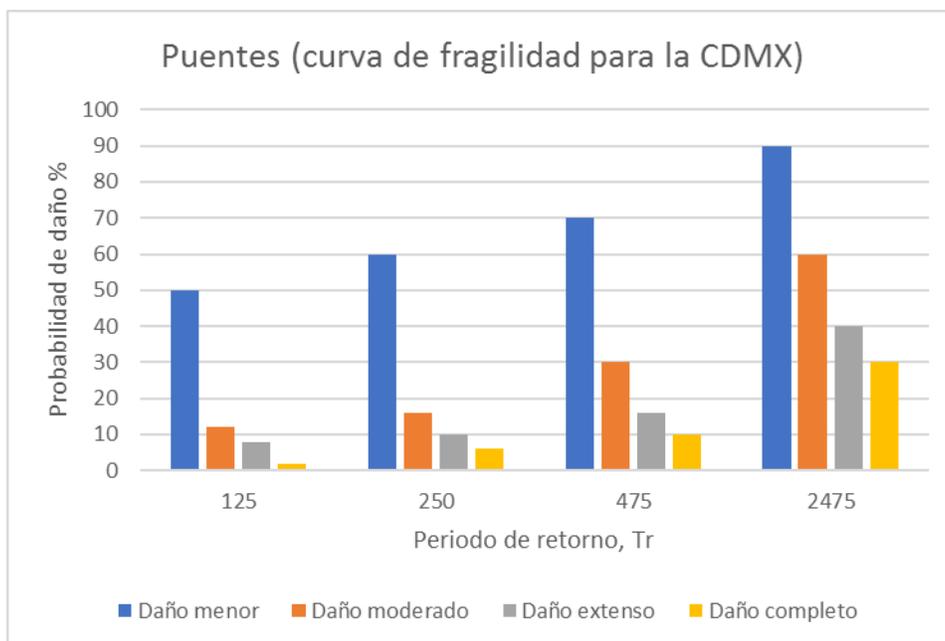


Figura 4.24 Probabilidad de daño para un sismo de subducción



El análisis de estar o exceder cierto estado de daño para la infraestructura estratégica, nos proporcionó resultados de manera racional, de acuerdo al grado de incertidumbre de las curvas de fragilidad. Edificios de concreto presentan una probabilidad de daño (8 al 85%), puentes (16 al 65%), pistas de aterrizaje (15 al 75%), templos (95 al 99%), metro (10 al 63%) y avenidas (3 al 10%), dichas probabilidades de daño cambian dependiendo el periodo de retorno y el daño evaluado (leve, moderado, extenso y completo).

Para las curvas de la Ciudad de México la probabilidad de daño para viviendas de mampostería va de (5 al 65%), auditorios y teatros (2 al 100%), mientras que los puentes del (5 al 90%). Dichos resultados no se pueden comparar propiamente con los resultados obtenidos con las curvas de fragilidad propuestas por Hazus (1999), debido a que la infraestructura estratégica es diferente, exceptuando los puentes. Cabe señalar que el análisis de falla es diferente, ya que Hazus (1999) relaciona la probabilidad de daño con la  $S_a$  cuando el periodo es de un segundo, mientras que Mayoral *et al.*, 2016 relaciona la probabilidad de daño con la PGA en campo libre.

Se obtuvieron índices de resiliencia de la infraestructura estratégica del (82 al 89%), estos índices contemplan incertidumbres debido a los periodos de retorno manejados y a los diferentes estados de daño que se podrían presentar. Se debe de manejar un equilibrio refiriéndonos a términos monetarios, es decir, la estructura podría ser más resiliente dado una mayor cantidad económica invertida.





## 5 CONCLUSIONES

Se ha propuesto un método convencional para realizar la estimación de la resiliencia sísmica en la infraestructura estratégica.

Se obtuvieron dos espectros de respuesta representativos de la zona lacustre, tanto para un sismo normal como para un sismo de subducción.

Con las probabilidades de falla de la infraestructura estratégica, podemos observar cuales son las estructuras más vulnerables o que están más propensas a presentar algún daño si ocurre un terremoto.

Se tienen cuatro modelos de posible derrumbe de edificios, bastaría con saber la dirección de colapso para estimar si las avenidas aledañas al edificio serían bloqueadas.

Con la estimación de la resiliencia sísmica para la diferente infraestructura estratégica se puede llevar a cabo un plan maestro o un plan de contingencia para estar prevenidos acontecido un sismo, ya que conocemos las zonas críticas de la red simplificada, nos podemos enfocar en tener rutas alternativas dado que sabemos las vialidades que serán bloqueadas, este plan de contingencia podrá prevenir pérdidas humanas y económicas. Será mejor tener un plan preventivo que correctivo.





## 6 REFERENCIAS

Argyroudis S, Kaynia A.M y Pitilakis K. 2013. Development of fragility functions for geotechnical constructions: Application to cantilever retaining walls, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50: 106-116.

Argyroudis S, Selva J, Gehl P y Pitilakis K. 2015. Systemic Seismic Risk Assessment of Road Networks Considering Interactions with the Built Environment, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30: 524-540.

Asteris, P.G, Chronopoulos, M.P, Chrysostomou, C.Z, Va-rum, H, Plevris, V, Kyriakides, N y Silva, V. 2014. Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural systems, *Engineering Structures*, 62-63: 118-134.

Bárcena A. y Romo M.A. RADSH. Programa de computadora para analizar depósitos de suelo estratificados horizontalmente sujetos a excitaciones dinámicas aleatorias, febrero, 1994.

Bard, P-Y., Campillo, M., Chávez-García F.J. y Sánchez-Sesma, F. (1988). “The Mexico Earthquake of September 19, 1985—A Theoretical Investigation of Large- and Small-scale Amplification Effects in the Mexico City Valley México”, *Earthquake Spectra*, Vol. 4: 609-633.

Bolt, B.A. 1989. The nature of earthquake ground motion, in F. Nacim, ed., *The Seismic Design Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York.

Bruneau, M., Chang S., Eguchi R., Lee G., O’Rourke T., Reinhorn A.M., Shinozuka M., Tierney K., Wallace W. & Winterfeldt D.V. 2003. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities *Earthquake Spectra*, pp. 733–752.

Cázares J, 2013. Estimación de la vulnerabilidad sísmica para estructuras de mampostería considerando la calidad de la supervisión. M.S. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.

Chang, L., Elnashai, A. S., Spencer, B. F., Song, J. & Ouyang, Y. (2011), *Transportation System Modeling and Applications in Earthquake Engineering*, Report 10-03, Mid-America Earthquake (MAE) Center.

Cimellaro. G.P. 2013. Resilience-based design (RBD) modelling of civil infrastructure to assess seismic hazards, *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 1: 268-303.



- Cimellaro, G.P, Reinhorn, A.M y Bruneau, M. 2010. Framework for analytical quantification of disaster resilience, *Engineering Structures*, 32: 3639-3649.
- Cornell, C. A., 1968. Engineering seismic risk analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58: 1583-1606.
- Cornell, C. A., y Vanmarcke, E., 1969. The major influences on seismic risk, *Proc. 4<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago de Chile, 15-19 January.
- Cruz V.M, 2013. "Los Sismos. Una Amenaza Cotidiana" Primera Edición. Instituto de Geofísica de la UNAM
- Dong, Y & Frangopol, D.M. 2015. Risk and resilience assessment of bridges under mainshock and aftershocks incorporating uncertainties, *Engineering Structures*, 83: 198-208.
- Franchin, P., Lupoi, A. & Pinto, P. E. (2006), on the role of road network in reducing human losses after earthquakes, *Journal of Earthquake Engineering*, 10(2), 195-206.
- Goretti, A. & Sarli, V. (2006), Road network and damaged buildings in urban areas: short and long-term interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, 159-75.
- Gutenberg, B. y Richter, C. F., 1954. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, 2nd ed. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Hazus- MH 2.1. 1999. *Technical Manual. Multi-hazard Loss Estimation Methodology*, Washington, D.C.
- Joyner, W. B. y Boore, D. M., 1988. Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion. Pages 43-102 of: *Proceedings of Earthquake Engineering & Soil Dynamics II. Geotechnical Division*, ASCE.
- Karamlou, A & Bochini, P. (2015), Computation of bridge seismic fragility by large-scale simulation for probabilistic resilience analysis. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 44: 1959-1978.
- Kiani, A, Mansouri B. y Moghadam, A.S. 2016. Fragility curves for typical steel frames with semi-rigid saddle connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 118: 231-242.
- Kiremidjian, A., Moore, J., Fan, Y., Yazlali, O., Basoz, N. I. & Williams, M. (2007), Seismic risk assessment of transportation network systems. *Journal of Earthquake Engineering*, 11,371-82.



- Kostoglodov, V y Pacheco, J. (1999), “Cien años de sismicidad en México”, UNAM, Instituto de Geofísica, Poster, México.
- Kramer S, L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. University of Washington.
- Lee, C., Tsai, Y. y Wen, K. (2006). “Analysis of nonlinear site response using the LSST downhole accelerometer array data”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, ELSEVIER, Vol. 26: 435-460.
- Mayoral J.M, Romo M. A y Osorio L. 2007. Seismic parameters characterization at Texcoco Lake, México. Soil Dynamics Earthquake Engineering, 28: 507-521.
- Mayoral J.M, Argyroudis S y Castañón E. 2015. Vulnerability of floating tunnel shafts for increasing earthquake loading. Soil Dynamics and Earthquake Engineering.
- Mayoral J.M, Badillo A y Alcaráz M. 2016. Vulnerability assessment and resilience analyses of an enhanced urban overpass foundation. Submitted to the Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering.
- Naciones Unidas, 2012. Cómo desarrollar ciudades más resilientes Un Manual para líderes de los gobiernos locales. Una contribución a la Campaña Mundial 2010-2015.
- Nuti, C. & Vanzi. I. (1998), Assessment of post-earthquake availability of hospital system and upgrading strategies. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1403-23.
- Ordaz, M. y Faccioli, E. (1994). “Site response analysis in the Valley of Mexico: selection of input motion and extent of non-linear soil behaviour”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, John Wiley & Sons Ltd, Vol. 23: 895-908
- Ordaz, M., y Reyes, C., 1999. Earthquake hazard in Mexico City: Observations versus computations, Bulletin of the Seismological Society of America, 89: 1379-1383.
- Osorio F.O, 2007. Caracterización de parámetros sísmicos en el lago de Texcoco. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis para obtener grado de Maestro en Ingeniería.
- Osorio F.O, 2013. Microzonificación sísmica de la zona del ex lago de Texcoco. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ingeniería.
- Ovando E. y Romo M. P., 1990. Direcciones principales de movimiento en la Ciudad de México, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM.



Pejovic J, y Jankovic S. 2016. Seismic fragility assessment for reinforced concrete high-rise buildings in Southern Euro-Mediterranean zone, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14: 185-212.

Pestana J.M, Sancio R.B, Bray J.D, Romo M.P, Mendoza M.J, Moss R.E.S, Mayoral J.M, y Seed R.B (2002) Geotechnical Engineering Aspects of the June 1999 Central Mexico Earthquakes. *Earthquake Spectra*: August 2002, Vol. 18, No. 3, pp. 481-499.

Pitilakis, K, Crowley,H y Kaynia A.M. 2014. Syner-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk. Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities.

RCDF (2004) “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal” Administración Pública del Distrito Federal, Jefatura de Gobierno, “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones.

Reyes, C., 1999. El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios, Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Posgrado, Febrero.

Romo M.P, Ovando S.E y Ossa A. 2007. The sinking of México City: Its effects on soil properties and seismic response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27:333-343.

Santos, J., Gouzeva, T., and Santos, G. (2014). Earthquake risk perception and México City’s public safety, *International Symposium on Safety Science and Technology*, 84: 662-671.

Seed, H. B., Idriss, M. I. y Arango, I., 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 109(3): pp 458-82.

Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder L. F., and Chung, R. M. (1984). The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations, Report No. EERC 84-15, University of California, Berkeley.

Seed H.B, Romo M.P, Sun J.I, Jaime A., y Lysmer J. 1988. The Mexico Earthquake of September 19, 1985. Relationships between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions.

Selva J, Argyroudis S, Pitilakis K. 2013. Impact on loss/risk assessments of inter-model variability in vulnerability analysis. *Nat Hazards* 67(2):723–746. Doi: 10.1007/s11069-013-0616-z.



Singh, S. K., Rodriguez, M. y Esteva, L., 1983. Statistics of small earthquakes and frequency of occurrence of large earthquakes along the Mexican subduction zone, Bull. Seism. Soc. Am. 73, 1779- 1796.

Singh, S.K. y Ordaz, M. (1993). “On the origin of the long coda observed in the lake-bed strong-motion records of Mexico City”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 83: 1298-1306.

Vucetic, M. (1992). “Soil properties and seismic response”, Tenth world conference earthquake engineering, Balkema, Rotterdam y Brookfield, Madrid, España, pp: 1199-1204.

Yee, E., Stewart, J.P. y Tokimatsu, K. (2013). “Elastic and large-strain nonlinear seismic site response from analysis of vertical array recordings”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 139(October): 1789.