



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA
RESILIENCIA SÍSMICA EN
REDES DE TRANSPORTE**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL
GRADO DE:
ESPECIALISTA EN VÍAS TERRESTRES

PRESENTA:
ADRIANA BADILLO VILLEGAS

DIRECTOR DE TESIS:
**DR. JUAN MANUEL MAYORAL
VILLA**



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Gracias a mis padres y mi hermano, porque sin ustedes este logro no sería lo mismo, los amo.

A mi mamá, porque un verso no es suficiente para agradecerte todo el amor, apoyo y felicidad que me das todos los días.

A mi papá, porque a pesar de ya no estar aquí, el solo pensar en ti me hace sonreír y siempre me inspira a seguir.

A mi hermano, por siempre estar ahí, por siempre escuchar y porque sé que algún día lograrás esto y más.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme formado como Ingeniera Civil y como persona.

Gracias al Instituto de Ingeniería de la UNAM, y en especial al Dr. Juan Manuel Mayoral Villa por siempre mantenerme motivada a ser mejor y exigir lo mejor de mí y porque sus enseñanzas me han ayudado a ser mejor profesionalista.

Gracias a mis amigos, a ustedes que siempre estarán.

Gracias en especial a mis amigos, Mau, Isma, Luis Arturo, Dani y Alan, por siempre hacer divertidos mis días, dentro y fuera del Instituto.



Contenido

TEMA Y PROBLEMA DE APLICACIÓN	i
OBJETIVOS	ii
HIPÓTESIS	ii
INTRODUCCIÓN	iii
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Origen de los sismos	1
1.2 Sismicidad en México	1
1.3 Propiedades dinámicas y parámetros geotécnicos del suelo	5
1.4 Vialidad urbana	9
El sistema vial urbano	9
El sistema vial estructural de las ciudades	9
Clasificación del sistema vial urbano	9
Subsistema primario	10
Subsistema secundario	10
2. RESILIENCIA	12
2.1 Resiliencia sísmica	12
2.2 Aspectos fundamentales que deben de caracterizar a una ciudad resiliente.....	13
2.3 Resiliencia en México	15
3. METODOLOGÍA	17
3.1 Definición de la zona de estudio e identificación de infraestructura estratégica.....	17
Zona de estudio	17
Infraestructura estratégica	19
3.2 Definición y selección de curvas de fragilidad específicas para evaluar la infraestructura crítica.....	21
Definición de los estados de daño	23
3.3 Planteamiento de la red simplificada.....	24



3.4 Cálculo del riesgo sísmico.....	26
Identificación de las fuentes sismogénicas.....	28
Caracterización de los modelos de recurrencia	29
Definición de la relación de atenuación	30
Obtención de Espectros de Peligro Uniforme (EPU).....	30
Análisis de respuesta de sitio	31
3.5 Evaluación de la probabilidad de falla	33
3.6 Evaluación de la pérdida de la conectividad y sus afectaciones a la resiliencia	36
Análisis de un segmento crítico en la red.....	41
4. CONCLUSIONES	51
REFERENCIAS.....	53



TEMA Y PROBLEMA DE APLICACIÓN

En esta investigación, se evaluó la resiliencia sísmica en una zona estratégica del sur de la Ciudad de México. Para esto, se llevó a cabo un levantamiento de infraestructura estratégica, que incluye líneas y estaciones de metro, tren ligero y metrobús, así como pasos elevados, puentes, estadios, hospitales, estaciones de bomberos y escuelas. Tomando en cuenta toda esta infraestructura, se planteó una red de transporte que después fue simplificada basada en las avenidas más importantes. Se realizó un análisis de riesgo sísmico probabilístico, en el cual los eventos sísmicos fueron representados a través de espectros de peligro uniforme asociados a cuatro periodos de retorno, 125, 250, 475 y 2475 años. Estos espectros se calcularon para las dos zonas sísmicas de mayor influencia en México, la zona normal y la zona de subducción.

La vulnerabilidad de cada elemento de la red de transporte se analizó utilizando curvas de fragilidad para cada tipo de infraestructura. Éstas expresan la probabilidad de que se alcance o supere un cierto estado límite, provocado por algún evento extremo. En nuestro caso, la aceleración máxima del terreno será nuestro estado límite y éste será provocado por la ocurrencia de un sismo.

Para la simulación de la red de transporte, se utilizó un modelo “colapso/bloqueo” propuesto por Argyroudís (2015), el cual consiste en tomar en cuenta la probabilidad de que los escombros procedentes de algún colapso puedan bloquear alguna parte de la red. El análisis de la red de transporte se desarrolló tomando en cuenta solamente la funcionalidad de rescate inmediatamente después del sismo, para definir los sectores críticos de la red con respecto a la continuidad y conectividad de la red. Por último se realizó la estimación de la resiliencia sísmica en un cruce crítico de la red, con base a su nivel de servicio, antes y después del sismo.



OBJETIVOS

Evaluar la resiliencia sísmica en una zona ubicada al sur de la Ciudad de México, la cual cuenta con infraestructura estratégica necesaria para la recuperación después de un sismo. En esta zona, plantear una red simplificada que abarque las avenidas principales y evaluar su vulnerabilidad ante diferentes sismos, con diferentes periodos de retorno. Analizar los posibles bloqueos que podrán presentarse a lo largo de red, por escombros provenientes de infraestructura colapsada, por falla de puentes y por afectaciones a la vialidad propia. Con los resultados obtenidos, identificar las zonas más críticas del sistema, lo cual es un paso elemental para poder crear un sistema efectivo de mitigación del riesgo, que ayudará a mejorar la resiliencia del sistema ante un evento sísmico.

HIPÓTESIS

La zona de estudio se encuentra alojada dentro las tres zonas que define el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, Zona de Lomas, de Transición y Lacustre. Por lo tanto, la infraestructura seleccionada, presentará diferentes niveles de daño dependiendo de la zona en la que se encuentren. Los daños que se presenten en la infraestructura afectarán las vialidades aledañas debido a los escombros provenientes de su colapso. Además, la falla en puentes también provocará daños a la circulación, lo que hará que los tiempos de llegada de los equipos de rescate sea mayor, y por lo tanto, que la recuperación del sistema se vea afectada, es decir, que su resiliencia disminuya.



INTRODUCCIÓN

Por su situación geográfica y su contexto social y económico, la Ciudad de México, a lo largo de su historia, ha hecho frente a múltiples impactos. Lo anterior nos demuestra que los habitantes de la Ciudad enfrentamos riesgos dinámicos y cambiantes que nos deben impulsar a crear un sistema de constante aprendizaje e innovación para encarar amenazas presentes y futuras. Es por eso que en los últimos años el tema de resiliencia ha sido un tema de gran auge en nuestro país. La resiliencia se define como la capacidad de un sistema a operar en una situación de crisis extrema, tal como un evento sísmico severo, y de recuperarse de manera eficiente (Timmerman 1981, Pimm 1984).

La ciudad se enfrenta a retos de resiliencia a nivel ambiental, social y económico, debido a la acelerada expansión urbana y el crecimiento poblacional de las últimas décadas, a la que se suma la insuficiente planeación a largo plazo y una débil coordinación a nivel metropolitano y megalopolitano. Otro elemento a considerar, es que la ciudad pasó de ser una zona lacustre a una de las megaciudades más pobladas del planeta y está situada en una de las regiones sísmicas más activas del mundo. Todo esto la convierte en un receptor sísmico y la hace susceptible a terremotos de gran magnitud. Un claro ejemplo es el terremoto de 1985, que ha sido uno de los eventos más significativos en nuestro país, el cual dejó miles de víctimas, afectó a casi el 4% de todos los edificios existentes en esa época en diferentes magnitudes (Soberón et., al 1986) y a su vez, provocó la suspensión del transporte público y cortes a la circulación, lo que hizo que el llegar a diferentes puntos de la ciudad en donde se necesitaban equipos de emergencia fuera muy complicado.

La infraestructura de transporte ha sido identificada por el Departamento de Seguridad Nacional de los Estados Unidos (US Department of Homeland Security) como uno de los dieciséis sistemas de infraestructura crítica esenciales para el bienestar de las sociedades modernas. Por lo que en una ciudad con condiciones como la nuestra es importante hablar sobre resiliencia sísmica en la infraestructura de transporte y en este caso específicamente, de las redes de transporte.

La resiliencia de una infraestructura civil de gran escala e interdependiente, incluyendo redes de transporte, servicios públicos e instalaciones de telecomunicaciones, juegan un papel importante en la determinación de la resiliencia de una comunidad en conjunto. El desempeño de las redes de transporte en particular, es fundamental debido a que la restauración de prácticamente todas las instalaciones y líneas de ayuda en una comunidad después de un sismo, dependen de que las personas y el equipo de emergencia necesario sean capaces de llegar a los puntos en donde han ocurrido los daños (Zhang & Wang 2016). En el caso de la infraestructura civil, se asocian cuatro atributos a la



resiliencia (Bruneau et., al 2003, Chang & Shinozuka 2004) o las 4R por sus siglas en inglés (Robustness, Redundancy, Resourcefulness y Rapidity).

- 1) Robustez, es la habilidad de resistir un evento extremo y de poder otorgar un cierto nivel de servicio aún después de ocurrido el evento.
- 2) Redundancia, es el grado en el que los elementos, sistemas u otras unidades de análisis que existen pueden ser sustituidos.
- 3) Estrategia, se puede conceptualizar como la habilidad de identificar problemas, establecer prioridades, y movilizar al personal y a los recursos financieros después del evento extremo.
- 4) Rapidez, la capacidad de recuperar la funcionalidad deseada lo más rápido posible.

Estos cuatro atributos están presentados en la Figura 1; todos están caracterizados por varias incertidumbres. Con estrategias de mitigación del riesgo e inversiones económicas, se puede mejorar gradualmente la resiliencia de un sistema contra futuros desastres, como se muestra en la Figura 1b.

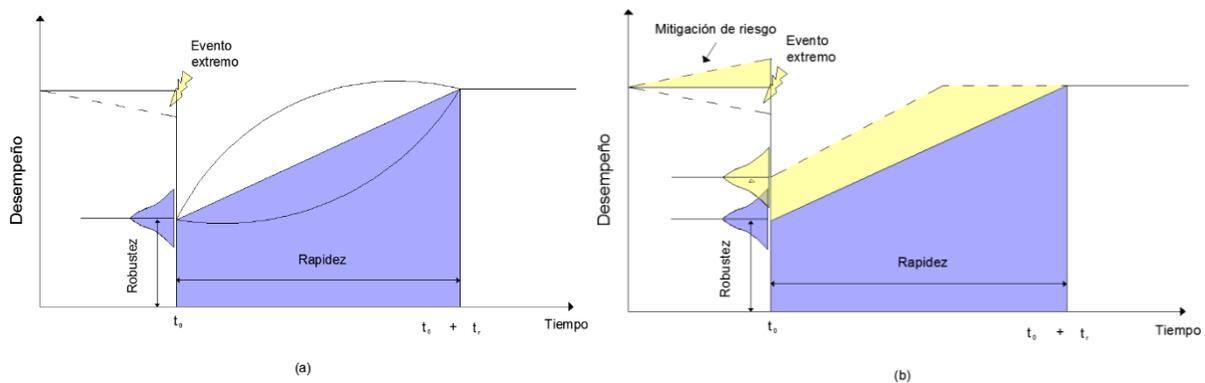


Figura 1. Representación del (a) concepto de resiliencia y (b) efecto de un plan de mitigación de riesgo (Zhang & Wang 2016)

En el caso de las redes de transporte, tales estrategias de mitigación del riesgo, normalmente conllevan una rehabilitación o un reacondicionamiento de los puentes de la red y de las vías en sí. Sin embargo, los procesos ingenieriles están sujetos a las limitaciones financieras y al recurso de personal. Por consiguiente, la identificación y priorización de las zonas más críticas es un paso elemental para poder crear un sistema efectivo de mitigación del riesgo. Tal sistema requiere no solamente la consideración física y estructural de la vulnerabilidad de cada elemento estratégico de la red, sino también una perspectiva del sistema que tome en cuenta la operación promedio pre- y post- desastre y la funcionalidad de la red como un todo.

En este trabajo, se presenta la evaluación de la resiliencia sísmica de una zona del sur de la Ciudad de México, utilizando el método convencional para evaluar los efectos de sismos normales y de



subducción con diferentes periodos de retorno, expresados en términos de aceleraciones máximas del suelo (PGA).

La evaluación se hizo a través de la estimación de los colapsos potenciales en edificios y componentes críticos de la red de transporte (túneles, pasos elevados, avenidas, líneas de metro, estaciones de metrobús y tren ligero), utilizando curvas de fragilidad apropiadas. Una curva de fragilidad es una función matemática que expresa la probabilidad de que se produzca un acontecimiento indeseable, es decir, que alcance o supere un cierto estado límite; normalmente una medida de aceleración o deformación, provocado por un sismo, huracán, inundación, tsunami u otro evento extremo.

Para la simulación de la red de transporte, se utilizó un modelo “colapso/bloqueo” propuesto por Argyroudis (2015), el cual consiste en tomar en cuenta la probabilidad de que los escombros procedentes de algún colapso puedan bloquear alguna parte de la red. El análisis de la red de transporte se desarrolló tomando en cuenta solamente la funcionalidad de rescate inmediatamente después del sismo, para definir los sectores críticos de la red con respecto a la continuidad y conectividad de la red. Por último se realizó la estimación de la resiliencia sísmica considerando los posibles daños que la red simplificada presentó.



1. MARCO TEÓRICO

1.1 Origen de los sismos

Los sismos se producen por la fractura de la roca que forma la corteza o manto superior del planeta tierra; se le llama foco o hipocentro del sismo al lugar del primer movimiento y de la liberación de energía en la falla, el epicentro es el punto en la superficie del planeta tierra que se encuentra sobre el foco o hipocentro. En muchas partes del planeta tierra, la corteza está siendo desplazada lentamente y la diferencia entre los desplazamientos de regiones vecinas provoca deformaciones elásticas que pueden llegar a ser mayores que la que la roca misma pueda soportar, como consecuencia sucede una ruptura (Bolt 1970) según esta teoría la energía sísmica proviene de la energía de deformación almacenada lentamente en las rocas que están sufriendo este fenómeno, dicha energía es liberada en forma de ondas de esfuerzos al producirse un punto de deslizamiento a lo largo de la falla. Con el paso del tiempo la teoría ha sido modificada considerando las propiedades plásticas de la roca (flujo plástico) para explicar los pequeños temblores que siguen a uno principal en una misma región (replicas). En conclusión, en esta teoría, la falla geológica es la causa de la mayoría de los temblores (no una consecuencia de ellos) y los desplazamientos relativos a lo largo de las fallas son la suma de desplazamientos durante dichos eventos, la iniciación y mantenimiento de las fallas dependerá del sistema de esfuerzos tectónicos en la corteza terrestre, en el transcurso del tiempo los estados de esfuerzos se modifican conforme a los cambios en las condiciones mecánicas, químicas y termodinámicas en el interior del planeta tierra. Los sismos no son siempre producto de los movimientos de las placas tectónicas, sino también de erupciones volcánicas, de explosiones en el interior de la corteza terrestre o inducidos por el relleno de flujos (agua de las presas o gases en pozos) que modifican el padrón de grietas en rocas ígneas intrusivas o metamorfisadas. Las erupciones volcánicas tales como la que ocurrió en la isla de Krakatoa, cerca de Java, en 1887, o la erupción del volcán Chichonal en 1981, ubicado al norte del estado de Chiapas, llegan a ser violentas pero no se comparan con la energía liberada por los sismos de orígenes tectónicos (Norris 1959).

1.2 Sismicidad en México

La alta sismicidad en el país, es debida principalmente a la interacción entre las placas de Norteamérica, la de Cocos, la del Pacífico, la de Rivera y la del Caribe, así como a fallas locales que corren a lo largo de varios estados. La Placa Norteamericana está separada de la del Pacífico pero roza con la del Caribe y choca contra las de Rivera y Cocos, de aquí la incidencia de los sismos.

Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Colima y Jalisco son los estados con mayor sismicidad en la República Mexicana debido a la interacción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera que subducen



con las de Norteamérica y del Caribe sobre la costa del Pacífico, por esta misma acción, son afectados los estados de Veracruz, Tlaxcala, Morelos, Puebla, Nuevo León, Sonora, Baja California, Baja California Sur y la Ciudad de México (Servicio Geológico Mexicano).

Rosenblueth (1987) concluyó que los movimientos del terreno en el Valle de México se originan básicamente por cuatro mecanismos de liberación de energía, el primero de ellos está asociado a la zona de subducción, el segundo es la falla normal que se produce entre las placas de Cocos y la de Norteamérica dentro del continente, el tercero está ligado con la liberación de energía producida en la placa continental, y el cuarto con las fallas en la placa Norteamericana en las inmediaciones del Valle de México. En la Figura 1.1 se muestra la ubicación de estos cuatro mecanismos de liberación de energía. De todos éstos, el que ha causado los daños más intensos en la Ciudad de México, es el que corresponde a la zona de subducción y hasta el momento los eventos más peligrosos para la Ciudad de México se generan en las costas de Michoacán y Guerrero. En esta zona, los temblores se producen a profundidades relativamente superficiales, mismas que aumentan hacia el interior del continente a lo largo de varias secciones transversales a la trinchera que delimita el contacto entre las placas de Cocos y de Norteamérica.



Figura 1.1 Ubicación de los sistemas causantes de los cuatro tipos de sismos que afectan a la Ciudad de México (Rosenblueth 1987)

A pesar de que las zonas epicentrales se localizan en diversos puntos del Pacífico, la Ciudad de México, se ha convertido en el receptor sísmico de todos ellos debido a que se encuentra lo suficientemente cerca para experimentar sus efectos. La causa de que éstos sean más dañinos en esta zona, radica en las condiciones de su subsuelo ya que ésta fue fundada en un lago, rodeada de montañas y volcanes.



El sismo más grande que se registró en este siglo fue el del 3 de Junio de 1932, ocurrido en las costas de Jalisco. Este terremoto tuvo una magnitud de 8.2 en la escala de Richter y una longitud de ruptura de 280 km. Otro sismo importante, tanto por su tamaño como por los daños producidos fue el sismo de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985. Este sismo se reporta con una magnitud de 8.1 y tuvo una ruptura que cubrió casi toda la costa del estado de Michoacán (una longitud de 180 km). A pesar de que su Epicentro se encontraba a más de 200 kilómetros de la ciudad de México, fue aquí donde se produjo el mayor daño (Kostoglodov y Pacheco 1999).

Este terremoto superó en intensidad y daños al registrado en 1957, la réplica acontecida un día después también tuvo gran repercusión para la capital al colapsar estructuras reblandecidas un día antes, cerca de 30 000 estructuras presentaron daños totales, y 68 000 daños parciales, entre los edificios más importantes que presentaron daños severos estaban el edificio Nuevo León del conjunto urbano Tlatelolco, los edificios A1, B2 y C3 del Multifamiliar Juárez, Televisión (hoy Televisa Chapultepec), los hoteles Regis (Figura 1.2), el hospital Juárez, el hospital general y el Centro Médico Nacional. El área de carpeta asfáltica que se vio afectada con grietas, hundimientos y fracturas fue de 516 mil metros cuadrados, también 32 estaciones del Sistema de Transporte Colectivo Metro presentaron afectaciones, incluyendo la estación Isabel la Católica mostrada en la Figura 1.3. Como podemos observar en las figuras, la mayoría de los edificios que colapsaron en ese terremoto, afectaron la comunicación y la red vial debido a que los escombros provenientes de los edificios, bloqueaban las avenidas y calles en las que estaban ubicados. La Tabla 1.1 muestra los daños causados en la Ciudad de México por el evento sísmico de 1985 de acuerdo a investigaciones de Bitrán (2001).



Figura 1.2 Daños ocasionados por el sismo de 1985 en el Hotel Regis (hoy Plaza de la Solidaridad)



Figura 1.3 Daños en estaciones del metro después del sismo, estación Isabel la Católica

Tabla 1.1 Daños causados en la Ciudad de México por el terremoto de 1985 (Bitrán (2001))

Sector	Pérdidas económicas en miles de millones de pesos
Sectores Sociales	487.7
Salud	177
Educación	130.4
Vivienda	180.3
Infraestructura de Servicios	611.3
Edificios públicos	390.3
Comunicaciones	105
Turismo	59.7
Acueductos y Drenajes	7.6
Energía	6.5
Transporte	5.8
Banca	20.6
Recreación	6.8
Servicios Personales	9
Otros Sectores	214.1
Industria y Comercio	143.5
Pequeña industria y comercio	136.3
Gastos para la emergencia	23.8
Demolición y remoción de escombros	46.8
TOTAL	1449.4



Este tipo de terremotos de gran magnitud han ocurrido en diferentes partes del mundo y se ha observado que las fallas en puentes y pasos elevados pueden causar grandes afectaciones al rendimiento de una red de transporte después de un sismo. Por ejemplo, el sismo de Japón de 1995 que tuvo una magnitud de $M_w = 7.2$ y que su epicentro se ubicó cerca de zonas densamente pobladas, provocó cerca de 5000 víctimas y a esto se le sumaron los problemas clásicos causados por un sismo de gran magnitud como la falta de energía eléctrica, agua potable y el colapso del alcantarillado. Por otra parte, las vías urbanas elevadas de un solo pilar sufrieron daños debido a que en ellas se presentó el efecto de péndulo invertido, este tipo de falla se muestra en la Figura 1.4, las columnas de los puentes o autopistas elevadas fueron construidas y diseñadas tomando en cuenta el gran peso de la superestructura, sin considerar el efecto de la fuerza cortante debido al aumento de la carga durante el sismo, el acero longitudinal era eficiente hasta cierto punto, pero el concreto al no tener un buen confinamiento, debido al pobre refuerzo transversal, estalló.



Figura 1.4 Daño en un paso elevado durante el sismo de Kobe en 1995

1.3 Propiedades dinámicas y parámetros geotécnicos del suelo

La naturaleza y la distribución del daño sísmico están muy influenciados por la respuesta del suelo frente a cargas cíclicas, dicha respuesta está controlada en gran medida por las propiedades del suelo. Por ejemplo, la susceptibilidad de un depósito de suelo para amplificar el movimiento depende de las propiedades dinámicas, siendo el módulo de corte, G , y el de amortiguamiento, ξ , los principales parámetros para modelar la respuesta sísmica del suelo. Estos parámetros se relacionan a su vez, con otras propiedades del suelo, como por ejemplo el índice de poro, la densidad relativa y la velocidad de onda de corte.



Un parámetro clave en estudios de la evaluación de la respuesta sísmica de suelos es la velocidad de onda de corte, normalmente su valor se deduce a partir de ensayos o técnicas de reconocimiento de suelos, por ejemplo, se han estudiado a lo largo del tiempo correlaciones de la velocidad de onda de corte con el valor del número de golpes, N , en el ensayo de penetración estándar (SPT) (Hardin y Drnevich 1972).

Como se mencionó anteriormente la amplificación del movimiento en el suelo está determinada por las propiedades dinámicas del suelo, entre éstas, la rigidez del suelo y el amortiguamiento son las propiedades clave para el estudio de la respuesta de sitio. Una buena aproximación a la rigidez del suelo se obtiene a partir del módulo de corte G que se calcula por medio de la velocidad de las ondas sísmicas. La razón de amortiguamiento, ξ , muestra la capacidad que tiene el suelo para disipar la energía. Otras propiedades dinámicas son la densidad ρ y el índice de Poisson ν , pero éstas tienen menor influencia. El movimiento provocado por un terremoto es una carga cíclica rápida que provoca en el suelo un comportamiento tenso-deformacional no lineal, como el descrito en la Figura 1.5, que corresponde a la curva de histéresis deformación de corte γ contra tensión de corte τ . El módulo de corte se define como la relación entre la tensión y la deformación de corte en un punto determinado de la curva de la Figura 1.5 y es una medida de la dureza del material. Se obtiene calculando la pendiente de la curva tensión- deformación y en función de dónde se evalúa está pendiente se distingue entre el módulo de corte tangente (G_{tan}), secante (G_{sec}) o máximo (G_{max}) (Hardin y Drnevich 1972).

En la Figura 1.6 se ilustran dichos módulos: el módulo de corte máximo (G_{max}), calculado como el valor de la pendiente de la recta tangente en el punto inicial de la curva, el módulo de corte tangente (G_{tan}) que es el valor de la pendiente en un punto de la curva y el módulo de corte secante (G_{sec}) que se calcula como la pendiente de la recta secante a la curva. El módulo de corte G está relacionado con el coeficiente de Poisson ν y el módulo de Young E de acuerdo a la siguiente expresión y es válida para materiales que tienen un comportamiento isótropo:

$$E = 2(1 + \nu)G$$

Por otra parte, la razón de amortiguamiento expresa la capacidad del material para disipar la energía y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S}$$

donde, W_D es la energía disipada y W_S es la energía de deformación máxima.

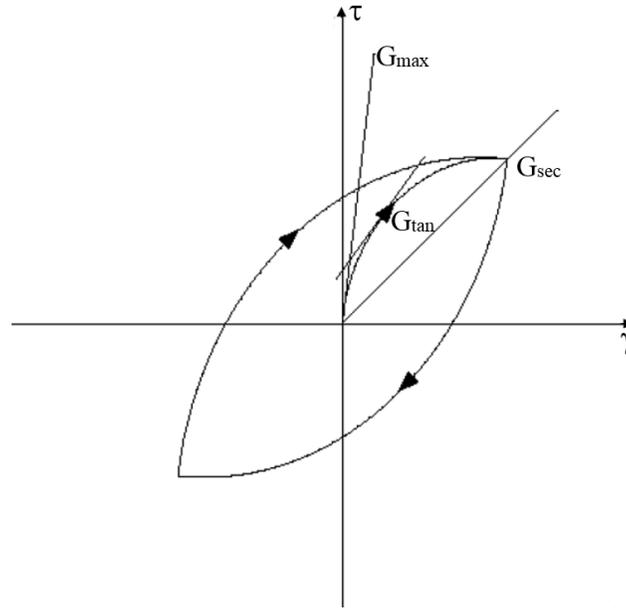


Figura 1.5 Curva histéresis tensión de corte τ (kPa) vs deformación de corte γ (%), y definición de módulo de corte máximo G_{max} , tangente G_{tan} y secante G_{sec} (Hardin y Drnevich, 1972)

En la Figura 1.6 se observa que el módulo de corte disminuye a medida que aumenta el nivel de deformación y es importante mencionar que la razón de amortiguamiento también depende de la magnitud de la deformación, siendo mayor a medida que aumenta la deformación de corte.

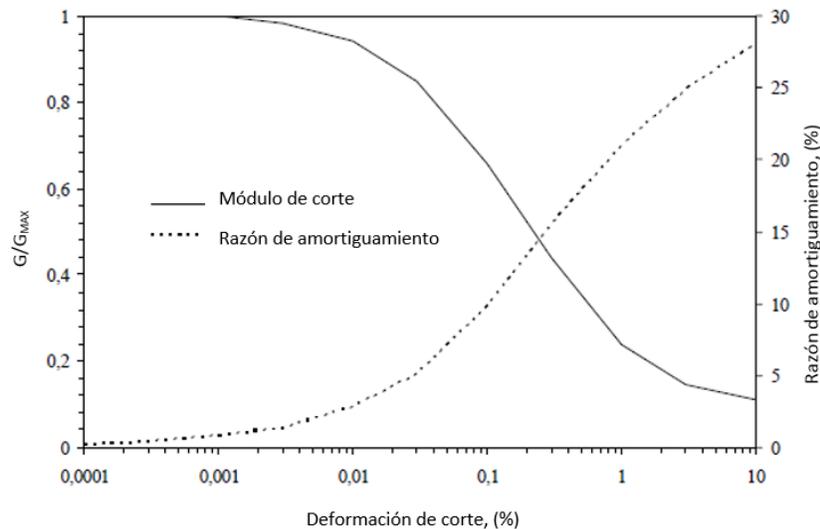


Figura 1.6 Curva de reducción del módulo de corte y variación de la razón de amortiguamiento con el nivel de deformación de corte para una arcilla blanda (Hardin y Drnevich, 1972)



El índice de plasticidad, el cual tiene influencia en estos parámetros, se define como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, donde ω_L y ω_P se expresan en %.

$$IP = \omega_L - \omega_P$$

La disminución del módulo de corte con el aumento de la deformación es mayor cuando el índice de plasticidad (IP) del material aumenta (Figura 1.7), esto para suelos ligeramente consolidados ($OCR > 1$) con alto índice de plasticidad. En cambio, para suelos normalmente consolidados ($OCR = 1$), $G_{máx}$ permanece más o menos constante. Esta característica es muy importante, ya que puede influir en la manera en que un depósito de suelo amplificará o atenuará los movimientos provocados por un terremoto. Y para un índice de plasticidad alto, la razón de amortiguamiento disminuye con el aumento de la deformación de corte (Vucetic y Dobry 1991).

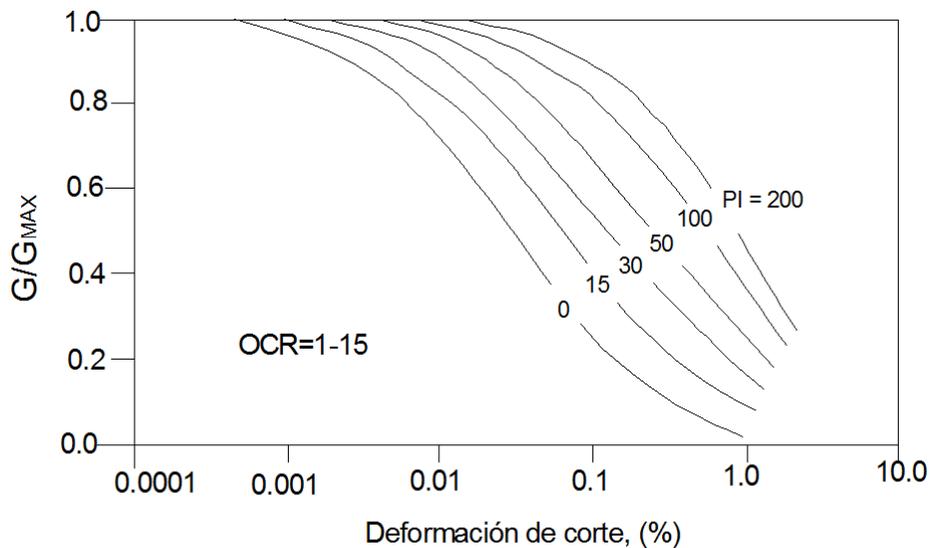


Figura 1.7 Variación del módulo de corte en función del grado de sobreconsolidación del suelo y del índice de plasticidad y de la deformación (Vucetic y Dobry 1991)



1.4 Vialidad urbana

El sistema vial urbano

En las últimas décadas se ha comprobado, a nivel mundial, una tendencia migratoria de grandes masas de población hacia los centros urbanos, esta migración ha producido un rápido crecimiento de las ciudades y conjuntamente con este comportamiento, el número de vehículos ha crecido en una progresión geométrica. En estas circunstancias, muchas áreas de las ciudades sufren concentración y cambios en el uso del suelo y la demanda de tránsito ha crecido sin que exista la posibilidad de que aumente proporcionalmente la infraestructura vial, debido a las altas inversiones requeridas (SEDESOL).

El sistema vial estructural de las ciudades

El sistema vial es el principal soporte de los flujos generados por las actividades urbanas y es también el principal estructurador de las ciudades, determinando la localización de las actividades urbanas y sus limitaciones de expansión. La apertura de una nueva vía repercute sobre el uso del suelo, induciendo el establecimiento de algunas actividades, inhibiendo el asentamiento de otras, acelerando procesos de deterioro o cambios en los usos del suelo. La importancia de la alteración que producen los sistemas viales queda demostrada por la expansión que ocurre en muchas ciudades alrededor de las vías que las entrecruzan.

Clasificación del sistema vial urbano

El sistema vial urbano está dividido en dos subsistemas, el subsistema primario y el secundario.

El subsistema primario debe constituir una estructura celular, que aloje en su interior y conecte entre sí al conjunto de núcleos que forman la ciudad. Las vías que componen esta red están destinadas a desplazamientos de más longitud y de mayor volumen de tránsito, de la manera más expedita que sea posible; uniendo los distintos sectores de la ciudad y asegurando la conexión entre la ciudad y la red nacional de carreteras. Tienen como fin secundario el acceso a las propiedades colindantes.

El subsistema secundario tiene como función principal, el distribuir el tránsito de las propiedades colindantes al subsistema primario o viceversa. Los desplazamientos son cortos y los volúmenes del tránsito vehicular son de menor importancia.



Subsistema primario

El subsistema primario a su vez, está dividido en tres:

- **Vías de acceso controlado:** En las vías de acceso controlado, todas las intersecciones o pasos con otros tipos de vías, son a desnivel. Las entradas y las salidas están proyectadas de tal manera, de proporcionar una diferencia mínima entre la velocidad de la corriente principal y la velocidad del tránsito que converge o diverge. Además, constan de calles laterales de servicio a ambos lados de las calzadas centrales, con fajas separadoras (camellones) central y laterales.
- **Arterias principales:** Las arterias principales son vías de acceso controlado parcialmente, es decir, las intersecciones que forman con otras arterias o calles pueden ser a nivel, controladas con semáforos o a desnivel. Este tipo de vía cuando la demanda del tránsito futuro lo amerite, se convertirán en vías de acceso controlado, por lo que su derecho de vía deberá ser semejante a estas últimas.
- **Arterias:** Las arterias son aquellas vías primarias con intersecciones controladas con semáforos, en gran parte de su longitud. El derecho de vía es menor que el requerido para las autopistas y arterias principales. Con o sin faja separadora central (camellón). De uno o dos sentidos del tránsito. Puede contar con carriles reversibles o carriles exclusivos para el transporte colectivo (autobuses y trolebuses).

Subsistema secundario

El subsistema secundario a su vez, está dividido en cuatro:

- **Calles colectoras:** Las calles colectoras son aquellas vías que ligan el subsistema vial primario con las calles locales. Estas vías tienen características geométricas más reducidas que las arterias. Pueden tener un tránsito intenso de corto recorrido, movimientos de vueltas, estacionamiento, ascenso y descenso de pasaje, carga y descarga y acceso a las propiedades colindantes. Generalmente son de un solo sentido del tránsito.
- **Calles locales:** Las calles locales se utilizan para el acceso directo a las propiedades y están ligadas con las calles colectoras. Los recorridos del tránsito son cortos y los volúmenes son bajos. Deberá evitarse el tránsito de paso por estas calles, ya que de otra manera se demerita su función. Generalmente son de doble sentido del tránsito y para evitar el tránsito de paso se diseñan con retorno en uno de sus extremos (calles cerradas).
- **Ciclopistas:** Las ciclopistas tienen como función el permitir la circulación de bicicletas exclusivamente, ya sea confinándolas en la vialidad primaria (en las fajas separadoras



centrales o en las calles laterales de servicio de las autopistas o arterias), o en calles o carriles exclusivas para su tránsito.

- Calles peatonales: Las calles peatonales tienen como función permitir el desplazamiento libre y autónomo de las personas, dando acceso directo a las propiedades colindantes, a espacios abiertos, a sitios de gran concentración de personas (auditorios, centros comerciales, estadios, estacionamientos, estaciones de transporte público de pasajeros, etc. Pueden ser exclusivas de una zona de interés histórico o turístico generalmente en el centro de las ciudades o en zonas de recreo.

La Figura 1.8 muestra un esquema de cómo está formado el sistema vial urbano.



Figura 1.8 Sistema vial urbano



2. RESILIENCIA

2.1 Resiliencia sísmica

La resiliencia puede definirse como la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de los efectos de un evento catastrófico de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas (UNISDR, 2013). Es por eso que el hablar de resiliencia en una ciudad como la nuestra, la Ciudad de México, es de suma importancia. Ésta se encuentra expuesta a diferentes amenazas, tanto de origen natural como humano. Algunos de los impactos más frecuentes tienen origen hidrometeorológico; no obstante, los fenómenos geológicos, como el terremoto de 1985, han generado las mayores pérdidas económicas y de vidas. En tiempos recientes, la ciudad ha sido afectada por diversos fenómenos naturales como sismos, inundaciones y pandemias. La Figura 2.1 muestra los impactos en términos de la población afectada y los costos económicos directos ocasionados por los tres tipos de fenómenos predominantes durante el periodo de 1980-2013.

Tipo de fenómeno	Población afectada	Impacto económico *
 Hidrometeorológicos Lluvias, inundaciones, vientos, granizadas, desbordamientos de aguas negras.	49,970	\$ 32.4
 Geológicos Deslizamiento de laderas y sismos.	6,338	\$ 4,100
 Incendios forestales 8,657 incendios	17,549 ha afectadas	\$ 2.7

* Millones de dólares (precio promedio anual periodo 1980-2014).

Figura 2.1 Impactos socioeconómicos por fenómenos naturales en la CDMX, costos y población afectada de 1980-2013 (SEDEMA, CENAPRED 2015)

Los costos económicos directos más elevados han estado asociados con los daños del terremoto de 1985, por lo que la resiliencia sísmica, es una parte importante a considerar durante la evaluación total de la resiliencia de una ciudad como la Ciudad de México. Y la posibilidad de que otro desastre ocurra por un sismo de alta magnitud sigue presente, por lo que la continua construcción de resiliencia es un factor clave para proteger vidas, vivienda, la infraestructura estratégica, los servicios básicos como la red de agua potable y drenaje, la provisión de alimentos, y la red de transporte de la ciudad.



La resiliencia sísmica se conceptualiza como la capacidad de respuesta de una ciudad para recuperarse de los efectos sísmicos de manera oportuna y eficiente, mediante la rehabilitación de sus estructuras y funciones básicas. La resiliencia es en sí, es una capacidad de respuesta, y ésta mejora si se identifican los peligros y los recursos que se tienen para atenderlos, es decir, de las vulnerabilidades y fortalezas. En este caso se identificará la infraestructura estratégica y las partes más vulnerables de la red de transporte.

La resiliencia será entonces un proceso de respuesta a la adversidad, en donde ser resiliente es la capacidad que tiene el conjunto de componentes de un sistema para dar solución a un evento catastrófico. Otro aspecto a tener claro cuando hablamos de resiliencia es la diferencia entre dos conceptos que pudieran ser asociados. Es necesario entender que resiliencia no es lo mismo que sostenibilidad, se habla de ciudades sostenibles cuando nos queremos referir a aquellas que pueden ser capaces de mantenerse por sí mismas, que pueden mantener sus condiciones de estabilidad sin ayuda del exterior. Por otro lado, las ciudades resilientes son aquellas que han sufrido algún tipo de afectación y sin embargo han sabido adaptarse superando las dificultades y recuperando su funcionamiento normal. Actualmente existen algunas instituciones que a nivel internacional, analizan la resiliencia a partir de una serie de variables, es así que analizaremos las propuestas de dos instancias que por su antigüedad y experiencia, resultan las más adecuadas. Por una parte, la Fundación Rockefeller (The Rockefeller Foundation) y por otra, la Alianza Resiliente (The Resilient Alliance).

2.2 Aspectos fundamentales que deben de caracterizar a una ciudad resiliente.

Una ciudad resiliente puede definirse, según el documento *Cómo desarrollar ciudades más resilientes* creado por la ONU en el 2015, como:

- Es una ciudad en la que los desastres son minimizados porque la población reside en viviendas y barrios que cuentan con servicios e infraestructura adecuados, los cuales cumplen con códigos de construcción razonables, y en la que no existen asentamientos informales
- Tiene un gobierno local incluyente, competente y responsable que vela por una urbanización sostenible y destina los recursos necesarios para desarrollar capacidades a fin de asegurar la gestión y la organización de la ciudad antes, durante y después de un evento desfavorable
- Es una ciudad en la cual las autoridades locales y la población comprenden sus amenazas, crean una base de información local compartida sobre las pérdidas asociadas a la ocurrencia de desastres, tomando en cuenta quién está expuesto y quién es vulnerable ante los posibles eventos catastróficos



- Ha tomado medidas para anticiparse a los desastres y mitigar su impacto, mediante el uso de tecnologías de monitoreo y alerta temprana, con los cuales protege la infraestructura, los activos y las vidas humanas, incluyendo sus casas y bienes, el patrimonio cultural así como la riqueza (medioambiental o económica)
- Es capaz de responder e implementar estrategias inmediatas de recuperación además de restaurar rápidamente los servicios básicos necesarios para reanudar la actividad social, institucional y económica

Así mismo, La Rockefeller Foundation, publica una síntesis de los factores que hacen que una ciudad sea resiliente, en este listado únicamente se seleccionaron los factores que tienen un impacto directo en el tema de esta investigación:

- Redes de comunicación: Se refiere a la necesidad de contar con sistemas bien conectados y que incluso, si uno llegara a fallar, el resto pueda seguir funcionando, se mantenga a flote y resulte confiable.
- Resiliencia social: consiste en que las ciudades tengan la capacidad de prepararse, adaptarse y recuperarse tras una afectación o crisis. Sobre esto, la fundación considera necesario que los vecinos tengan acercamientos y juntas en las que aprendan a desarrollar ésta cualidad en conjunto y estén plenamente conscientes de la disponibilidad de sus recursos y de la distribución de estos.
- Vías de tránsito rápido: Referido a los corredores y a los carriles confinados para autobuses, metro, tranvía, ciclovías, etc. Éstas son vías que no permiten el ingreso de vehículos privados.

A manera de profundizar, los factores anteriores guardan una estrecha relación con las 4 dimensiones que The Rockefeller Foundation (2014) expone como resultado de su amplia experiencia en la investigación de ciudades resilientes en todo el orbe, para evaluar la capacidad de recuperación de una ciudad nos propone el estudio de 12 variables. Debido a que este trabajo está enfocado al estudio de resiliencia sísmica, se mencionaran únicamente los más influyentes en el tema:

- Continuidad de los servicios fundamentales: caracterizado por una gestión activa, y mantenimiento de las infraestructuras esenciales que protegen y/o prestan servicios a los ciudadanos, esto aumenta las probabilidades de durabilidad de las infraestructuras y la mitigación de los impactos
- Comunicaciones confiables y movilidad eficiente: se consigue con sistemas de transporte multimodal y accesibles, redes tecnológicas de comunicación e información, planes de



contingencia que faciliten la rápida evacuación de masas y la comunicación en casos de emergencia, de igual manera, asegura que las ciudades están bien integradas y conectadas, permitiendo a las comunidades, especialmente a las más pobres y vulnerables, movilizarse en caso de un evento catastrófico.

2.3 Resiliencia en México

En el 2013, la Ciudad de México fue seleccionada para formar parte de la iniciativa 100 Ciudades Resilientes, promovida por la Fundación Rockefeller. Esta iniciativa representa una oportunidad para unir esfuerzos y capacidades para fomentar la construcción de resiliencia urbana en las ciudades.

Para la construcción de resiliencia se debe, por un lado, considerar el pasado para entender los riesgos asociados con su historia, como el hecho de que gran parte de la ciudad se encuentra situada sobre lo que antes era un lago; y por otro, tomar en cuenta los escenarios futuros, ya que la transformación social y ambiental continúa. De esta manera, será posible entender mejor los posibles riesgos y eventos sorpresivos que puede experimentar la ciudad y su población (Estrategia de resiliencia de la CDMX 2016).

Uno de los principales objetivos de esta iniciativa, es que la Ciudad de México pueda contar con las siete cualidades de una ciudad resiliente (Figura 2.2).

- **Inclusiva:** Proceso que hace hincapié en llevar a cabo una amplia consulta que permita la creación de un sentido de propiedad compartida o una visión conjunta para aumentar la resiliencia de la ciudad. Por ejemplo, una alerta temprana de riesgo, permitirá a las personas protegerse a sí mismos y minimizar pérdidas
- **Integrada:** El proceso y el resultado de la estrategia se construirán sobre esfuerzos continuos y complementarios. En vez de generar doble trabajo y conflicto, la estrategia será desarrollada para ayudar a las ciudades a alinear y aprovechar iniciativas y prioridades existentes junto con las nuevas
- **Sólida:** La estrategia se desarrollará a partir de un proceso claro y riguroso que integre los enfoques cuantitativos y cualitativos comúnmente aceptados



- **Ingeniosa:** La estrategia se elaborará teniendo en cuenta las restricciones de recursos de la ciudad y buscará describir opciones innovadoras para superarlas
- **Reflexiva:** La estrategia se diseñará para capturar lecciones periódicamente, información nueva o actualizada, así como también las dudas y el cambio constante. Mecanismos que permiten que la constante evolución permita a las ciudades tomar decisiones basadas en experiencias e información pasadas y en tiempo real
- **Redundante:** La estrategia contará con múltiples iniciativas para garantizar que las ciudades tengan la capacidad necesaria para abordar las diversas necesidades de resiliencia
- **Flexible:** Refiriéndose a la voluntad y capacidad para adoptar estrategias alternativas en respuesta a las circunstancias cambiantes, los sistemas pueden ser más flexibles a través de la introducción de nuevas tecnologías o conocimientos



Figura 2.2 Siete cualidades de una ciudad resiliente (Estrategia de resiliencia de la CDMX 2016)



3. METODOLOGÍA

El procedimiento que se propuso para evaluar la resiliencia sísmica en la red de transporte con el método convencional fue el siguiente:

- 1) Definición de la zona de estudio e identificación de infraestructura estratégica
- 2) Definición y selección de curvas de fragilidad específicas para evaluar la infraestructura crítica
- 3) Planteamiento de la red simplificada
- 4) Cálculo del riesgo sísmico
- 5) Evaluación de la probabilidad de falla
- 6) Evaluación de la pérdida de la conectividad y afectaciones a la resiliencia

3.1 Definición de la zona de estudio e identificación de infraestructura estratégica

Zona de estudio

Se ha elegido como caso de estudio un área estratégica al sur de la Ciudad de México la cual se muestra en la Figura 3.1a. Esta zona de estudio se eligió estratégicamente, ya que cuenta con infraestructura de transporte crítica e infraestructura fundamental en caso de presentarse algún evento sísmico catastrófico. Algunos de los elementos que forman parte de esta zona son:

- Líneas y estaciones de Metrobús
- Líneas y estaciones de Metro
- Líneas y estaciones de Tren ligero
- Pasos elevados
- Puentes y vías urbanas
- Dos estaciones de transferencia modal
- Dos estadios
- Una gran zona de hospitales

Por otra parte sobre la zona también se desplanta un número considerable de edificios importantes, suburbios, edificios gubernamentales, escuelas y universidades. La zona está comprendida por las tres diferentes zonas geotécnicas (Figura 3.1b) como lo define el artículo 170 del Capítulo VIII, del Título Sexto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, la Ciudad de México:



- Zona I o de 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, cavernas y túneles
- Zona II o de Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros
- Zona III o Lacustre, integrada por grandes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas con un contenido diverso de limo y arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas o muy compactas y de espesor variable el cual va de centímetros a algunos metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales

A su vez, diversas investigaciones y trabajos científicos en materia de Ingeniería Sísmica, han dado como resultado una zonificación sísmica de la Ciudad de México, que muestra las zonas con mayor impacto y que presentan aceleraciones del terreno desfavorables para la estabilidad de la infraestructura civil. Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, consideran la zonificación estratigráfica que fija el artículo 170 del RCDF. Adicionalmente, la zona III se divide en cuatro subzonas, IIIa, IIIb, IIIc y IIId (Figura 3.1b).

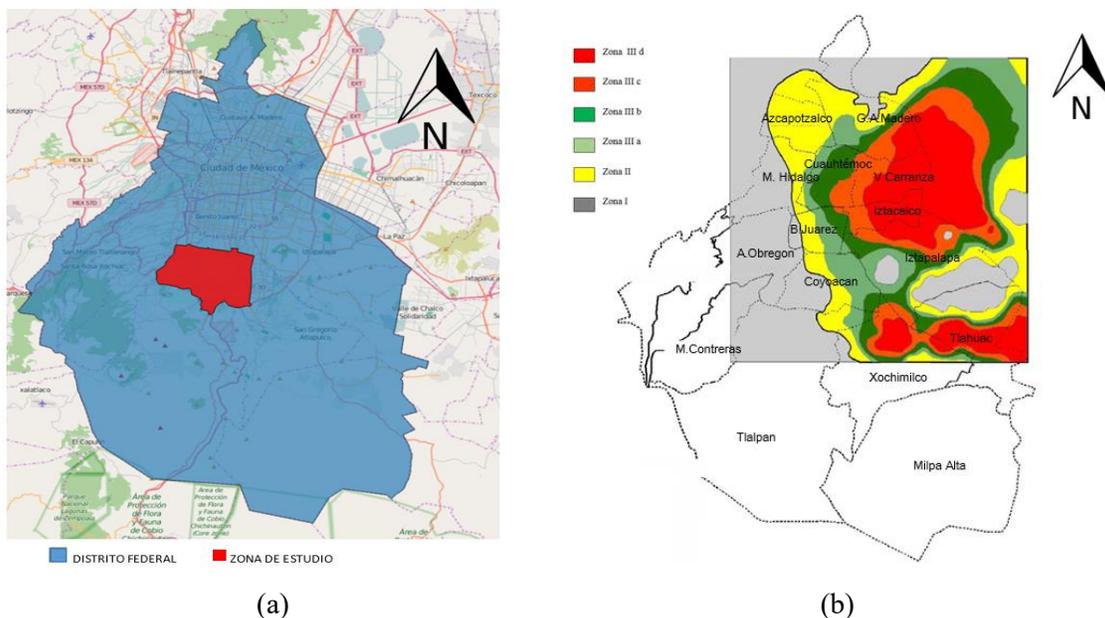


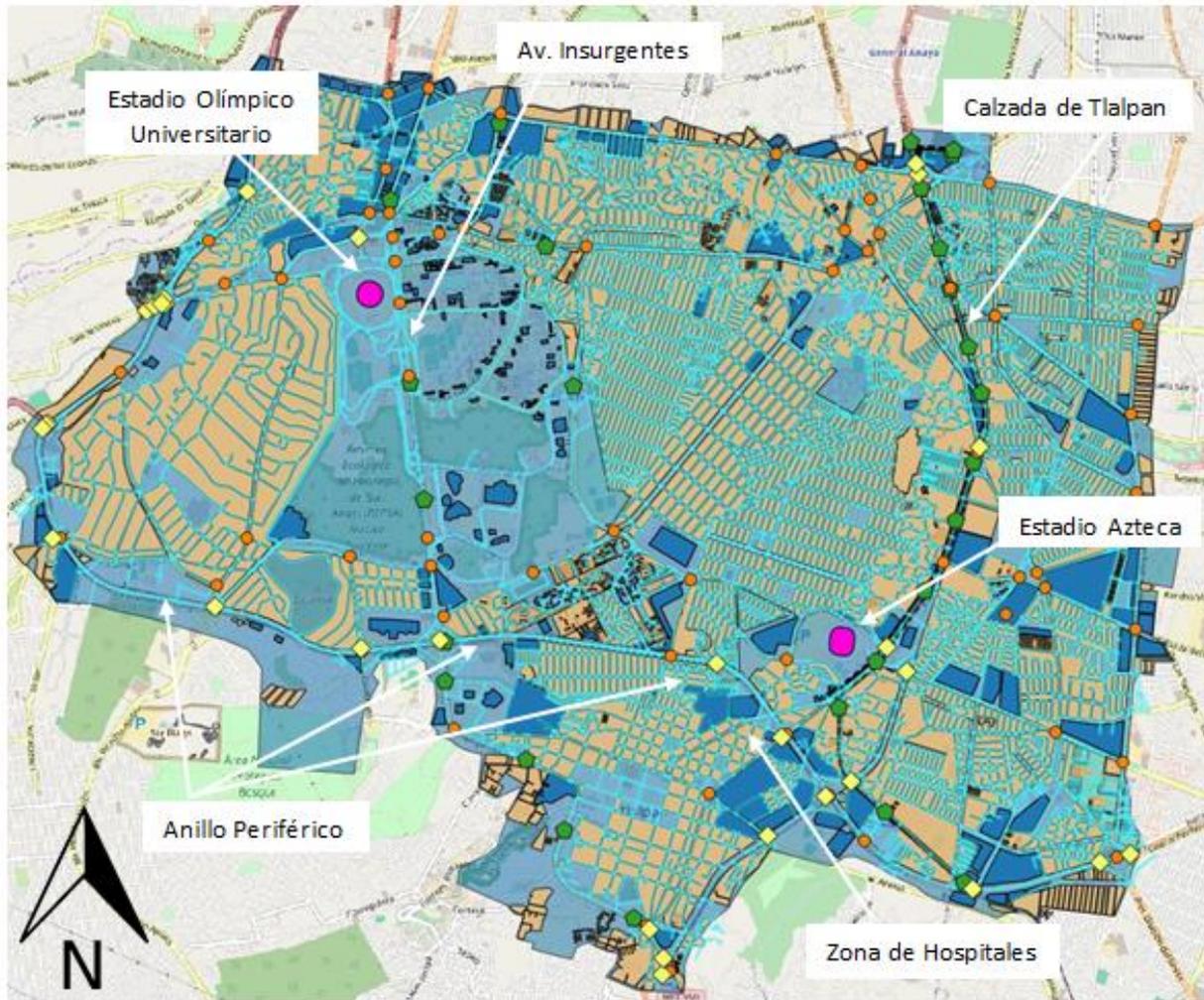
Figura 3.1. Ubicación de la zona de estudio



Infraestructura estratégica

La base de la operatividad y buen funcionamiento de una gran ciudad es su infraestructura, para realizar un análisis de resiliencia se tiene que generar una base de datos de la infraestructura existente en el lugar, en dicha base de datos se deben de considerar edificios importantes como hospitales, dependencias de gobierno, escuelas y edificios con características particulares (inmuebles muy antiguos o parcialmente dañados por eventos sísmicos ocurridos en el pasado). También deben de tomarse en cuenta vías de acceso controlado, avenidas principales, avenidas secundarias, pasos a desnivel, puentes, túneles y líneas de transporte. Es recomendable realizar esta base de datos en algún Sistema de Información Geográfica (SIG). La importancia de considerar vías de acceso controlado en esta base de datos se debe a que estas vialidades satisfacen la demanda de movilidad continua de grandes volúmenes, cuentan con accesos y salidas a los carriles centrales en lugares precisos y son catalogadas como la columna vertebral de una red vial.

La zona de estudio considera edificios fundamentales para el funcionamiento de la ciudad después de un evento sísmico, como hospitales, estaciones de bomberos y estaciones de policía. También toma en cuenta escuelas, estadios y edificios con características particulares (muy antiguos o anteriormente dañados por otros eventos sísmicos). También se generó de manera digital una red de transporte tomando en cuenta vías de accesos controlados (boulevard Adolfo López Mateos, Periférico) avenidas principales y secundarias, pasos a desnivel, puentes, túneles y líneas de transporte. La Figura 3.2 es una representación esquemática de la infraestructura estratégica tomada en cuenta para evaluar la resiliencia sísmica del caso estudio.



Símbolo	Tipo de infraestructura
	Puentes y pasos a desnivel
	Sistemas de transporte (metro, metrobús y tren ligero)
	Nodos en vialidades importantes
	Vialidades
	Edificios
	Manzanas
	Estadios

Figura 3.2 Mapa con la infraestructura estratégica considerada



3.2 Definición y selección de curvas de fragilidad específicas para evaluar la infraestructura crítica

La fragilidad de la infraestructura está relacionada con su vulnerabilidad sísmica y se puede cuantificar mediante curvas de fragilidad. Las curvas de fragilidad se definen como la representación gráfica de la función de distribución acumulada, de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño límite específico, dada una respuesta estructural, ante una acción sísmica determinada (HAZUS, 1999).

En este estudio se ha adoptado la metodología de HAZUS (FEMA, 1999) que define estas curvas suponiendo que siguen una distribución de probabilidad tipo log normal. La hipótesis de una distribución de probabilidad log normal, permite definir cada curva de fragilidad mediante dos parámetros: el valor medio y la desviación estándar. De esta manera, las curvas de fragilidad se definen mediante la siguiente ecuación:

$$P[ED \geq ED_i] = \varphi \left[\frac{1}{\beta_{ED}} \ln \left(\frac{Sd}{Sd_{ED}} \right) \right]$$

donde Sd_{ED} es el desplazamiento espectral medio para el cual la probabilidad de excedencia es del 50%, β_{ED} es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para el estado límite de daño, en otras palabras es la variabilidad asociada al estado de daño, φ es la función de distribución normal estándar acumulada, Sd es el desplazamiento espectral y ED indica el estado de daño el cual está definido en nuestro caso como: 1 para el estado de daño mínimo, 2 para moderado, 3 para severo y 4 indica el estado de daño completo (justo antes de que se produzca el colapso).

Para evaluar la vulnerabilidad de la red de avenidas y de la infraestructura crítica se eligieron curvas de fragilidad apropiadas según el tipo de estructura (Tabla 3.1) estas curvas son un elemento clave en la evaluación probabilista del riesgo sísmico, relacionan la intensidad sísmica con la probabilidad de alcanzar o superar un nivel de daño (p. ej. leve, moderado, severo y completo) para cada elemento en riesgo. La magnitud de la intensidad sísmica puede cuantificarse utilizando diversos parámetros, incluyendo la aceleración máxima del suelo (PGA), la velocidad pico del terreno (PGV), la deformación permanente del suelo (DGP), el desplazamiento (D), la aceleración espectral, la velocidad espectral o el desplazamiento espectral.



Tabla 3.1 Curvas de fragilidad utilizadas en este análisis

Infraestructura	Referencia	Medida de Intensidad
Edificios de concreto	(Pejovic & Jankovic 2016)	PGA
Edificios de acero	(Kiani et al. 2016)	PGA
Edificios de mampostería	(Pitilakis et al. 2016)	PGA
Puentes	(Mayoral et al. 2016)	PGA
Metro y BRT	(HAZUS, 1999)	PGA
Tren ligero	(HAZUS, 1999)	PGA
Avenidas	(HAZUS, 1999)	PGD
Vías urbanas	(HAZUS, 1999)	PGD

En la Figura 3.3 se muestra un ejemplo de curva de fragilidad y fue la utilizada para edificios de concreto.

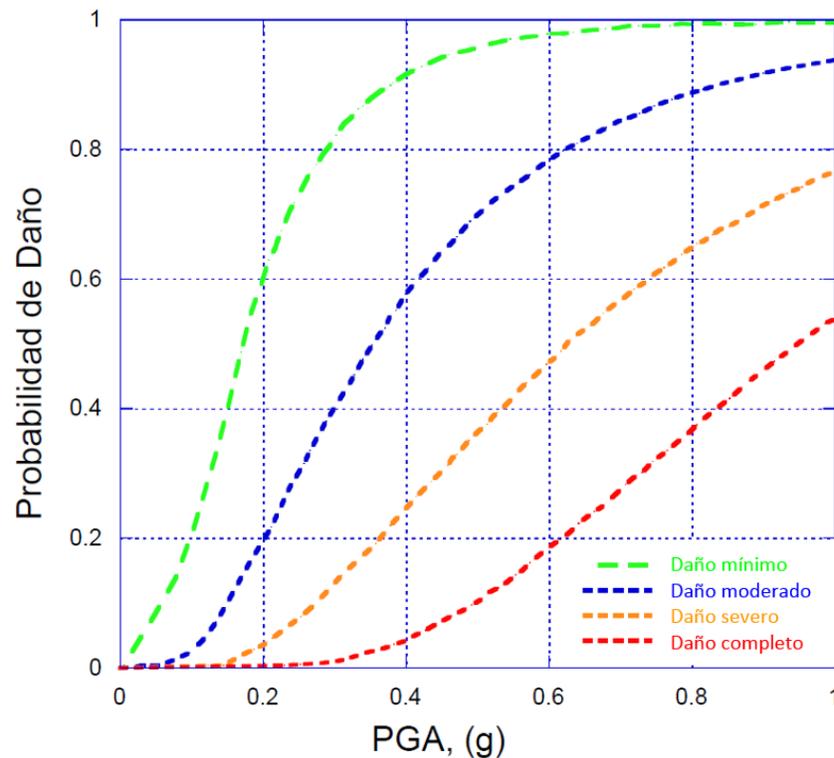


Figura 3.3 Curvas de fragilidad para evaluar la probabilidad de daño en edificios de concreto reforzado (HAZUS, 1999)



Definición de los estados de daño

Se definieron un total de cuatro estados de daño, daño mínimo (ED_1), moderado (ED_2), severo (ED_3), y completo (ED_4). A continuación se describen los daños que provocará cada ED_n .

Daño mínimo (ED_1):

- 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)

Daño moderado (ED_2):

- 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 al interior

Daño severo (ED_3):

- Vialidades: los asentamientos y desplazamientos del suelo son mayores que en los estados anteriores
- 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 presentar desplazamientos verticales de los contrafuertes
- Túneles: se caracteriza por asentamientos grandes en el portal del túnel y agrietamientos significativos del revestimiento

Daño completo (ED_4)

- 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



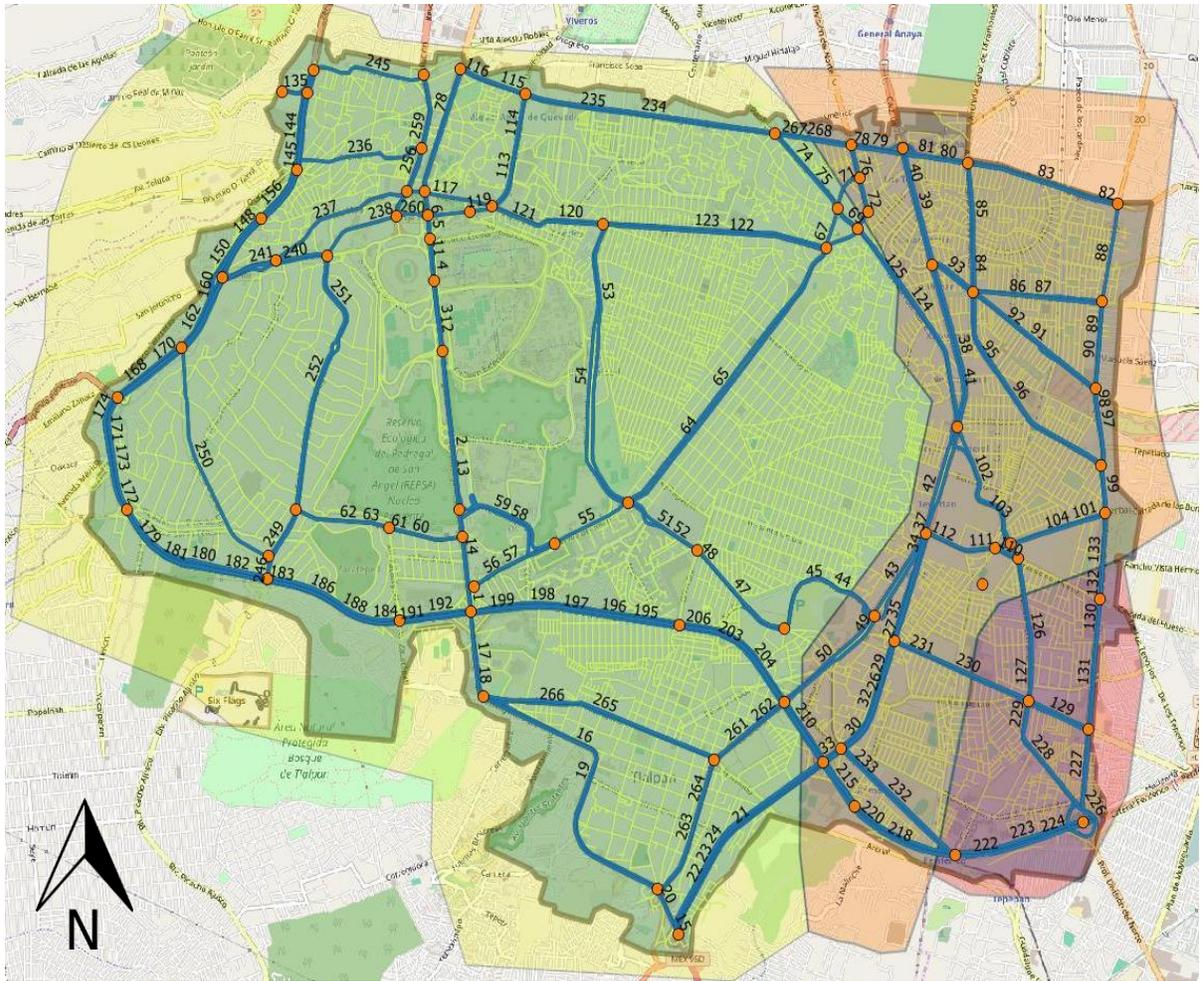
3.3 Planteamiento de la red simplificada

Para poder realizar el análisis de resiliencia y para los alcances de este trabajo, se generó una red estratégica simplificada. Los criterios tomados en cuenta para simplificar la red original fueron los siguientes:

- Las vialidades más importantes y transitadas
- Los puntos de la ciudad que cuentan con infraestructura de rescate y respuesta
- Las vialidades necesarias para llegar a los puntos definidos en el punto anterior

Las intersecciones y vialidades de mayor importancia, fueron representadas con nodos y arcos respectivamente como se muestra en la Figura 3.4. El tipo de infraestructura tomada en cuenta para la red simplificada fue infraestructura hospitalaria (e.j., Zona de Hospitales), estaciones de policía y estaciones de bomberos.

En la red simplificada mostrada en la Figura 3.4 se pueden apreciar en color anaranjado las intersecciones más concurridas y en color azul las vialidades, también se pueden observar en diferentes colores las tres diferentes zonas en distintos colores, ya que como se mencionó anteriormente la zona de estudio se encuentra dentro de estas tres. La red cuenta con 76 nodos y 113 arcos. Inicialmente el análisis de la red de transporte se lleva a cabo considerando sólo la función de rescate inmediatamente después del terremoto, para definir los sectores críticos de la red con respecto a la conectividad de la misma, posteriormente se amplía para tomar en cuenta la capacidad de adaptación de la red a los flujos automovilísticos altos a consecuencia del evento sísmico, lo que generara un aumento potencial de congestión vial debido al daño de la red.



Símbolo	Significado
●	Nodos de la red simplificada
—	Red simplificada
■	Zona de Lomas
■	Zona de Transición
■	Zona Lacustre

Figura 3.4 Red simplificada y zonificación sísmica de acuerdo al RCDF



3.4 Cálculo del riesgo sísmico

Las estructuras con un comportamiento sísmico inadecuado son la causa principal de las pérdidas humanas y económicas durante la ocurrencia de terremotos. Para analizar la resiliencia sísmica de las estructuras hay que comenzar por realizar estudios de riesgo sísmico, los cuales permiten evaluar la vulnerabilidad sísmica y estimar el daño probable que se puede presentar a causa de un terremoto.

Para llevar a cabo un análisis adecuado se debe disponer de una amplia información, que muchas veces no se tiene, además, existe una gran cantidad de incertidumbres involucradas, por lo tanto, el enfoque adecuado del problema es el probabilista. El método probabilista permite obtener probabilidades anuales de excedencia, para el parámetro del movimiento del terreno que se considera representativo del riesgo sísmico (Esteva 1967, Cornell 1968). En las primeras etapas del desarrollo del método, el parámetro de referencia era la aceleración máxima del terreno, PGA. Con el desarrollo de leyes de atenuación para parámetros espectrales fue posible la construcción de espectros de diseño en los que se considera la probabilidad de excedencia de todas las ordenadas espectrales para los periodos de interés en ingeniería sísmica. De este modo surgen los espectros de peligro uniforme (UHS, Uniform Hazard Spectra), que se construyen representando “punto a punto” las ordenadas espectrales con una misma probabilidad de excedencia o con un mismo período de retorno (Trifunac et al. 1987). En este trabajo se evalúa la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de la infraestructura crítica mediante una metodología basada en un análisis de respuesta de sitio probabilista realizado en el programa (RADSH) el cual se complementará con las curvas de fragilidad.

Para caracterizar el perfil estratigráfico de las zonas sismogénicas II y III se emplearon las estratigrafías mostradas en las Figuras 3.5 y 3.6, en las cuales también se puede observar la variación de la distribución de la velocidad de onda de corte a distintas profundidades.

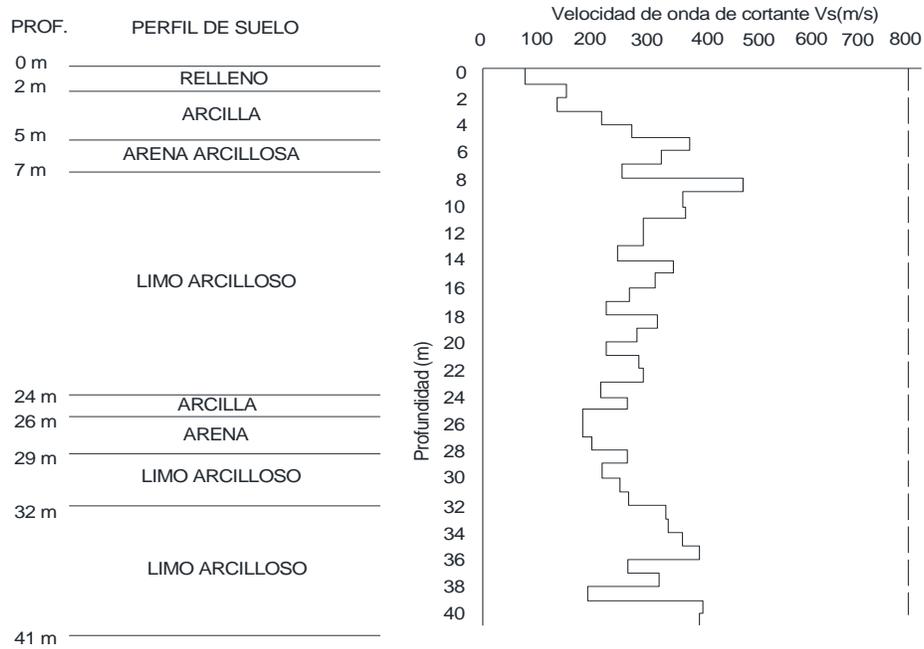


Figura 3.5 Perfil de suelo representativo de la zona II (de transición) acompañado de la variación de la velocidad de onda de corte

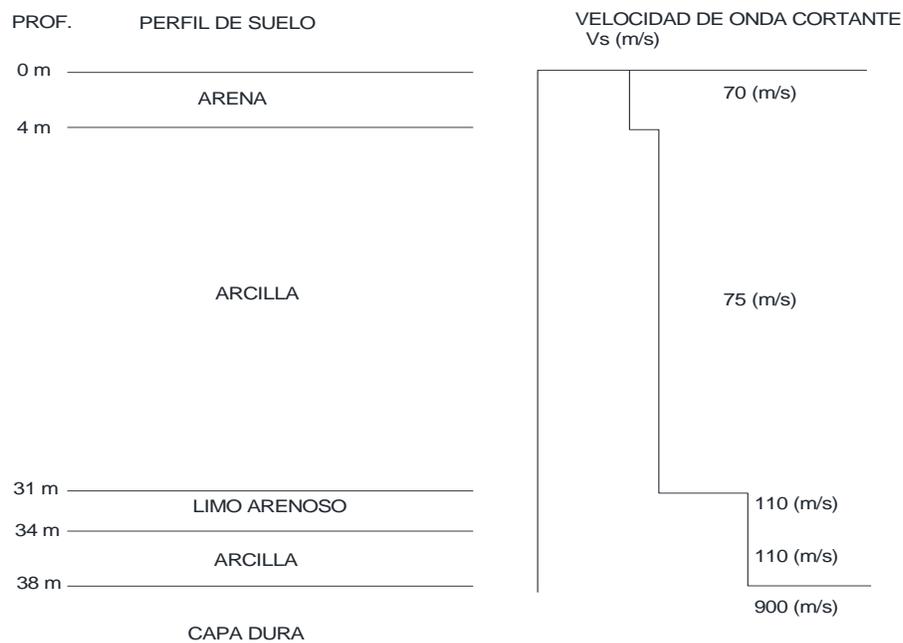


Figura 3.6 Perfil de suelo representativo de la zona III (lacustre) acompañado de la variación de la velocidad de onda de corte

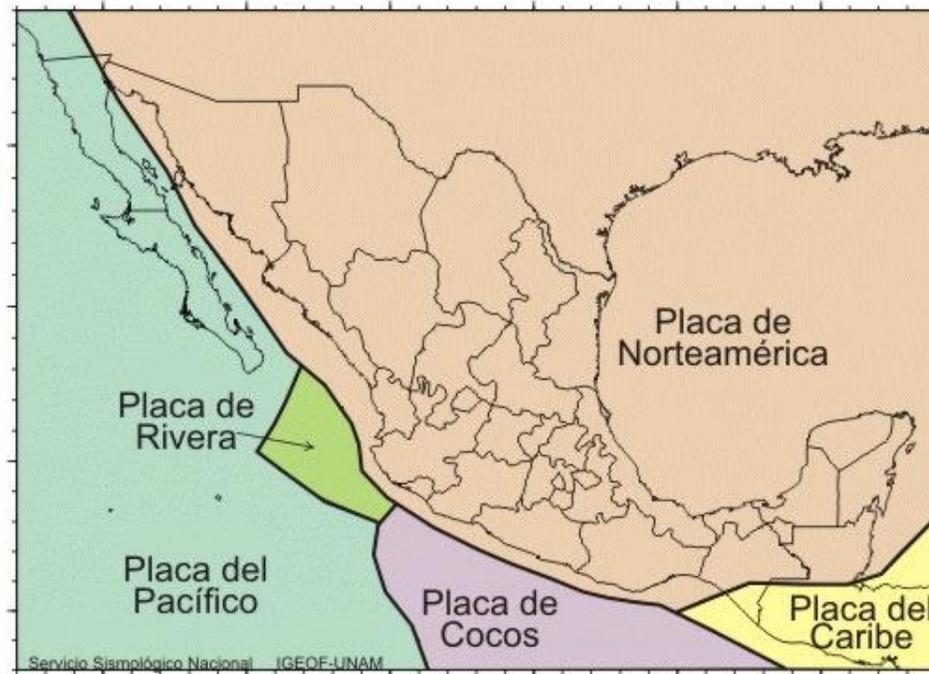


Figura 3.8 Placas tectónicas de interés, para el caso estudio

Una de las zonas sismogénicas utilizada en este trabajo es la zona de subducción mexicana, debido a que en esta zona es donde se han generados los temblores que han ocasionado mayor daño en la Ciudad de México. Con la finalidad de complementar el análisis y con el objetivo de generar un panorama más amplio en torno a la probabilidad de falla de la infraestructura de esta zona, también se consideraron eventos sísmicos normales.

Caracterización de los modelos de recurrencia

Para cada fuente sísmica se evalúa un modelo de recurrencia de eventos y un modelo de ocurrencia temporal de los mismos. Los modelos de recurrencia permiten determinar el tiempo promedio que tiene que pasar para tener un terremoto con características iguales, en un sitio determinado. Para el modelo de ocurrencia de los sismos se utilizó la relación frecuencia-magnitud de Richter y para el modelo de ocurrencia temporal, se usa el proceso estocástico de Poisson.



Definición de la relación 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 en la misma, las relaciones de atenuación se expresan como una función matemática que relaciona el parámetro de movimiento del terreno firme o roca, por ejemplo, la aceleración máxima del suelo (PGA), con los parámetros que caracterizan al sismo. La aceleración en el sitio depende principalmente de dos parámetros, tipo de suelo y distancia epicentral.

Obtención de Espectros de Peligro Uniforme (EPU)

Los espectros de peligro uniforme, EPU, son una representación de la relación que existe entre el período natural de vibración del suelo, T , y la aceleración espectral, S_a , para una probabilidad de excedencia dada asociada a un período de retorno. Para caracterizar los eventos sísmicos contemplados en este trabajo (normales y de subducción) se utilizaron espectros de peligro uniforme generados a partir de los análisis de peligro sísmico probabilista, contemplando periodos de retorno (Tr) de 125, 250, 475 y 2475 años. Finalmente, un total de ocho curvas de peligro sísmico fueron usadas para periodos (T) que van de cero a cinco segundos, la Figuras 3.9 muestra los espectros de peligro uniforme, para eventos normales y de subducción, respectivamente.

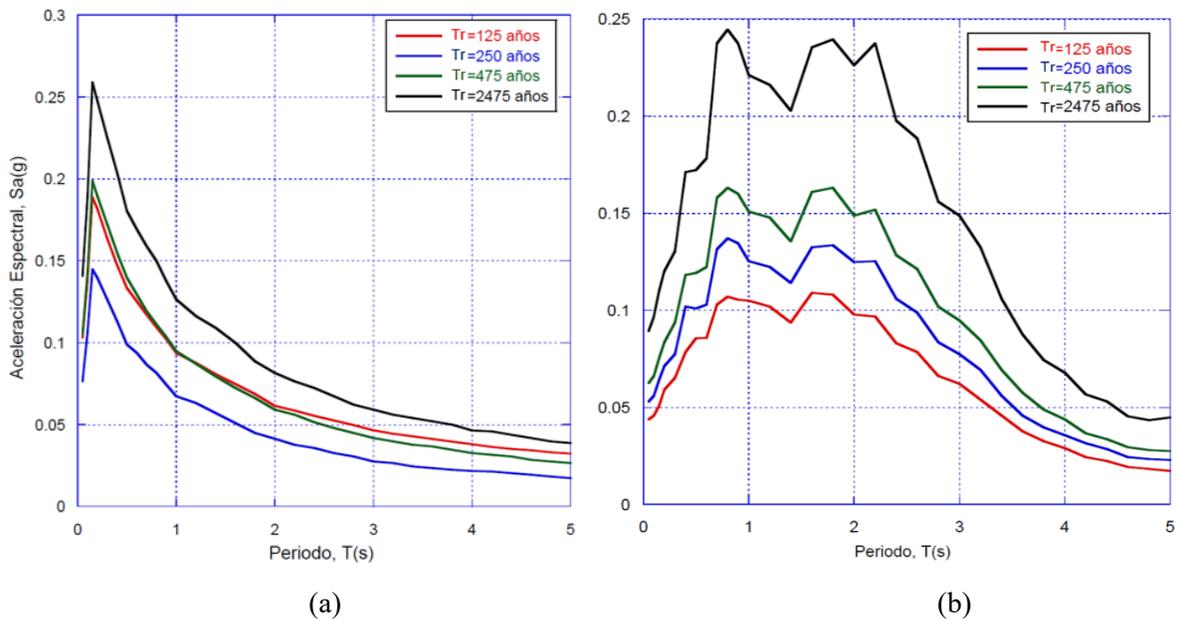


Figura 3.9 Espectros de peligro uniforme para eventos para eventos sísmicos (a) normales y (b) subducción



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, esfuerzos y deformaciones dinámicas para estimar riesgos asociados a los movimientos del terreno, y así determinar las fuerzas inducidas por un sismo, mismas que puedan llevar a la inestabilidad del terreno y de las estructuras que soporta.

Las respuestas de sitio calculadas para la zona de transición y lacustre, para cada tipo de evento (normal, subducción) se muestran en las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12.

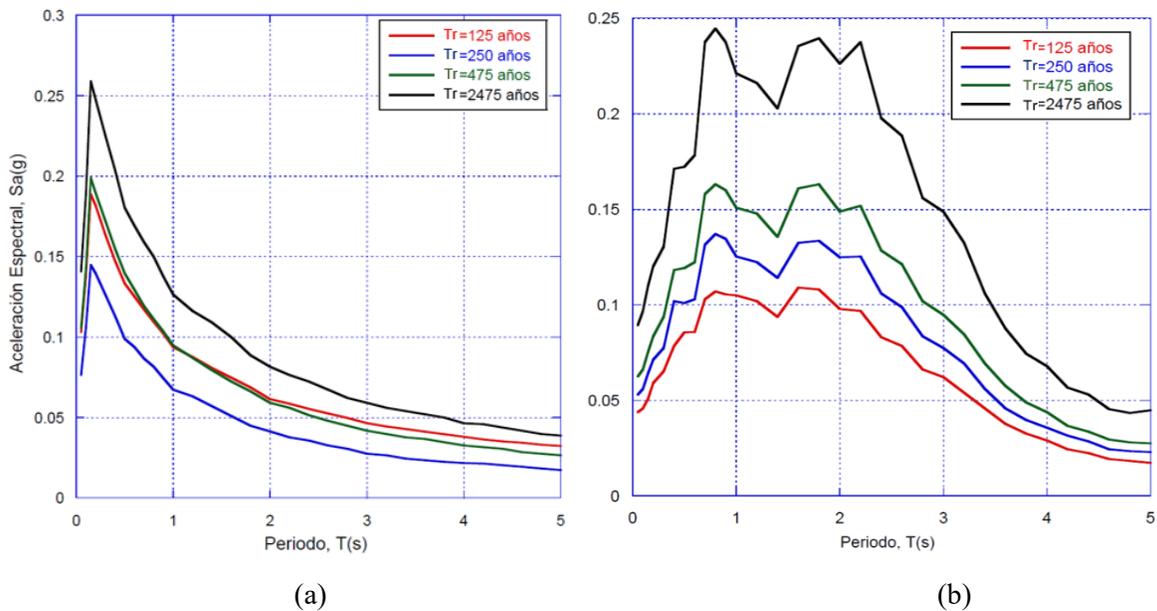


Figura 3.10 Respuesta de sitio para sismos (a) normales y (b) subducción para zona de lomas

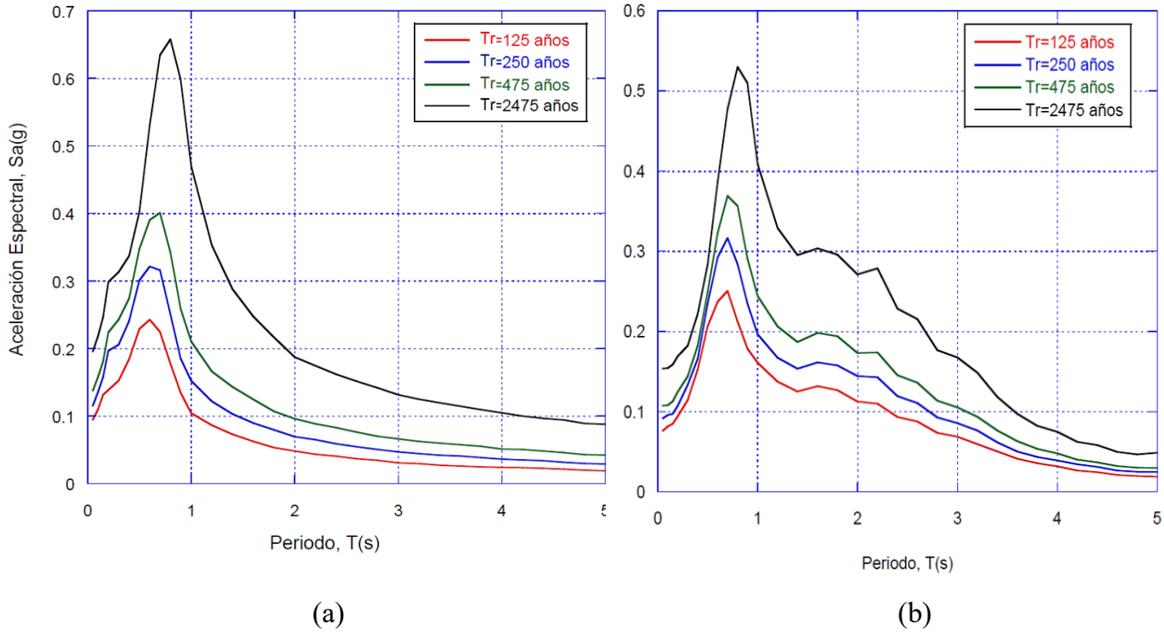


Figura 3.11 Respuesta de sitio para sismos (a) normales y (b) subducción para zona de transición

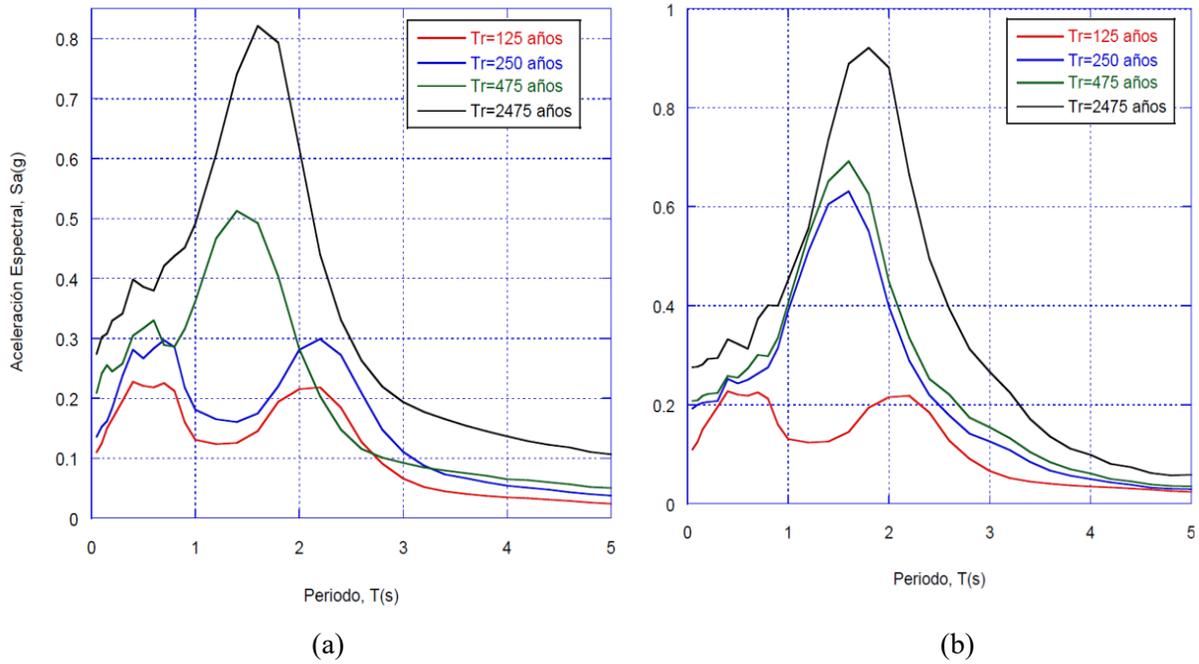


Figura 3.12 Respuesta de sitio para sismos (a) normales y (b) subducción para zona lacustre



3.5 Evaluación de la probabilidad de falla

La evaluación de la probabilidad de falla se llevó a cabo con ayuda de las curvas de fragilidad específicas seleccionadas para cada tipo de infraestructura. Como ya se mencionó, las curvas de fragilidad asocian una medida de intensidad con la probabilidad de que se presente. En este estudio, se tomaron en cuenta dos medidas de intensidad respectivamente, ya que algunas curvas de fragilidad seleccionadas asocian a la PGA como medida en intensidad y en otros casos PGD (ej. avenidas y vías urbanas).

Con base en los resultados del análisis de respuesta de sitio realizados, se calcula la probabilidad de falla de la infraestructura crítica de la siguiente manera:

Se selecciona la respuesta de sitio de acuerdo a la zona en la que se encuentra ubicada la edificación (lomas, transición o lacustre). De esta respuesta se toma la aceleración máxima del terreno (PGA), la cual, en caso de ser necesario se convierte a PGD (desplazamiento máximo) mediante la metodología propuesta por (Argyroudis et al. 2013). La Tabla 3.2 muestra todos los valores de PGA obtenidos para cada zona. Con estos parámetros, ya sea PGA o PGD, se entra al eje de las abscisas de la curva de fragilidad previamente seleccionada para cada infraestructura y se determina una probabilidad de falla para diferentes tipos de daño (mínimo, moderado, severo y completo). Esta metodología se lleva a cabo para cada infraestructura crítica dentro del área de estudio. Como podemos observar en la Tabla 3.2, las aceleraciones para la zona I son muy bajas en comparación a las otras zonas, debido al tipo de suelo que tiene esta zona. Por lo tanto, sus probabilidades de falla son prácticamente cero, así que fueron despreciadas. Las Tablas 3.3 a 3.7 muestran los resultados del procedimiento para daños moderados y severos, en zona II y III respectivamente.

Tabla 3.3 Aceleraciones máximas del terreno para cada zona y cada periodo de retorno [g]

	Periodo de Retorno (años)	Zona I	Zona II	Zona III
Subducción	125	0.008	0.076	0.110
	250	0.011	0.092	0.192
	475	0.014	0.107	0.208
	2475	0.026	0.154	0.276
Normal	125	0.044	0.095	0.110
	250	0.053	0.115	0.136
	475	0.063	0.137	0.209
	2475	0.089	0.196	0.274



Tabla 3.4 Probabilidad de falla para daños moderados en la zona de transición en porcentaje [%]

Infraestructura	Subducción				Normales			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
	años	años	años	años	años	años	años	años
Metro	0	0	0	1	0	0	1	5
Metrobús	0	0	0	1	0	1	2	3
Tren ligero	0	1	1	6	1	1	5	26
Puentes	0	0	0	5	0	4	5	10
Avenidas	0	0	0	0	0	0	0	0
Edificios								
Concreto	0	3	3	12	3	8	11	22
Mixtos	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3.5 Probabilidad de falla con daños moderados en la zona lacustre en porcentaje [%]

Infraestructura	Subducción				Normales			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
	años	años	años	años	años	años	años	años
Metro	0	5	6	16	0	1	6	16
Metrobús	0	3	5	15	0	2	5	15
Tren ligero	1	26	28	38	1	3	28	38
Puentes	0	10	12	22	0	2	12	22
Avenidas	0	0	0	1	0	0	0	1
Edificios								
Concreto	3	22	24	34	3	5	24	34
Mixtos	0	0	2	12	0	2	2	15



Tabla 3.6 Probabilidad de falla con daños severos en la zona de transición en porcentaje [%]

Infraestructura	Subducción				Normales			
	125 años	250 años	475 años	2475 años	125 años	250 años	475 años	2475 años
Metro	0	0	0	0	0	0	0	4
Metrobús	0	0	0	0	0	0	2	0
Tren ligero	0	0	0	3	0	0	2	6
Puentes	0	0	0	3	0	2	3	5
Avenidas	0	0	0	0	0	0	0	0
Edificios								
Concreto	0	2	2	3	0	3	5	5
Mixtos	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3.7 Probabilidad de falla para daños severos en la zona lacustre.

Infraestructura	Subducción				Normales			
	125 años	250 años	475 años	2475 años	125 años	250 años	475 años	2475 años
Metro	0	4	5	7	0	0	5	7
Metrobús	0	0	2	5	0	0	2	5
Tren ligero	0	6	8	11	0	0	8	10
Puentes	0	5	7	10	0	0	7	12
Avenidas	0	0	0	0	0	0	0	0
Edificios								
Concreto	0	5	7	10	2	4	7	10
Mixtos	0	0	2	5	0	0	2	4



3.6 Evaluación de la pérdida de la conectividad y sus afectaciones a la resiliencia

El propósito fundamental de una red de transporte es permitir el traslado origen-destino. La resiliencia de un sistema como éste, se puede evaluar como la habilidad que tiene el sistema de cumplir con su objetivo durante y después de un desastre natural o de uno provocado por el hombre. En este trabajo, como ya se ha mencionado anteriormente, enfocaremos el estudio a la capacidad que tendrá el sistema después de un evento sísmico. Eventos como éstos, pueden provocar daños a la infraestructura que se aloja en el sistema, desde daños a puentes, pasos elevados o a desnivel y daños a la infraestructura propia del sistema, es decir, daños a las vialidades. Estos daños a su vez, pueden generar pérdidas humanas y económicas a la sociedad, los cuales en una evaluación de resiliencia deberán tomarse en cuenta. Los alcances de este trabajo estarán limitados solamente a la capacidad del sistema después de un evento sísmico.

Una vez terminado el evento sísmico podrán saberse la cantidad de daños y pérdidas que éste provocó, lo que requerirá de recursos económicos y humanos para restaurar la funcionalidad del sistema. Estos recursos normalmente no son inmediatos, por lo que la existencia de rutas alternativas entre pares origen-destino es crucial para el funcionamiento continuo de la red de transporte durante el periodo de emergencia y respuesta, y es una característica fundamental de una red de transporte resiliente.

La evaluación de la pérdida de la conectividad se llevará a cabo tomando en cuenta tres posibilidades de bloqueo:

- Bloqueo por escombros provenientes de edificios colapsados por el sismo
- Bloqueo por deterioros en la vialidad causados por el evento sísmico
- Bloqueo por falla en puentes

El volumen y la extensión de los escombros provenientes de los edificios colapsados por el sismo, dependen de la geometría del edificio (principalmente de su altura) y del tipo de colapso. A su vez, el tipo de colapso depende de las características del sismo, las condiciones del suelo, el diseño del edificio (e.j., geometría, tipo de estructura), la continuidad de las fachadas de los edificios y de la ubicación del edificio. Cuando las fachadas son continuas, como normalmente ocurre en ciudades densamente pobladas, tales como la Ciudad de México, los edificios están en contacto y la dirección de colapso hacia las partes laterales se encuentra limitada, por lo que lo más probable es que el colapso



ocurra hacia la parte frontal y/o trasera del edificio. Así, a pesar de que el estudio del bloqueo debido a escombros provenientes de edificios es fundamental para llevar a cabo una evaluación de pérdida de conectividad, representa un problema complejo ya que depende de muchas variables, por lo tanto, al realizar este tipo de estudios son necesarios criterios apropiados y criterio ingenieril. En este trabajo, el bloqueo por escombros provenientes de edificios se llevó a cabo con el modelo “colapso/bloqueo” propuesto por Argyroudis (2015). El cual correlaciona la altura del edificio (Y) con el ancho de los escombros provocados (W_d) que se extienden más allá del ancho original del edificio (W). Estos modelos corresponden a colapsos en una, dos direcciones o al vuelco completo del edificio, como se muestra en la Figura 3.13. Empezando con el hecho de que el volumen total del edificio (V_T) es una fracción (k_v) del volumen original (V_o) (e.j., $V_T = k_v V_o$), se puede definir una ecuación para cada modelo, el cual estimará el ancho de los escombros como función de W , c , k_v y Y . Donde c es el ángulo que describe la inclinación del colapso.

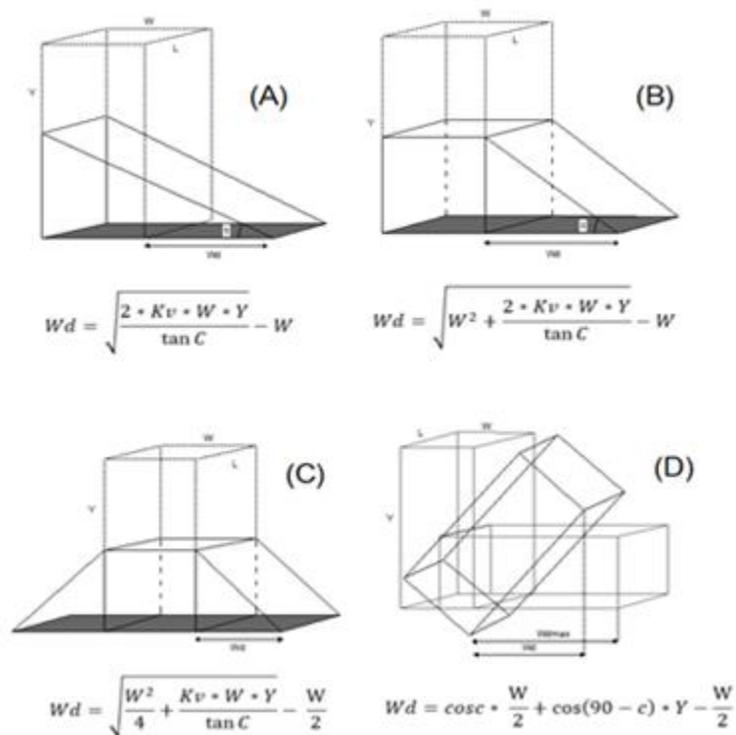


Figura 3.13 Estimación del ancho de los escombros debido a un colapso en una (A,B), dos direcciones (C) y vuelco total (D) (Argyroudis, 2015)



Para elegir los edificios que fueron analizados bajo este modelo se hicieron varias consideraciones.

- Como ya mencionó en el apartado “Evaluación de las probabilidades de falla” las probabilidades para zona I son prácticamente cero, por lo que toda la infraestructura alojada en esa zona no fue considerada para este análisis
- En “Calzada de Tlalpan” que es parte de nuestra red simplificada, sólo se tomaron en cuenta los edificios que tuvieran más de seis pisos de altura, ya que la calzada es muy amplia y con edificios de menor altura es poco probable que bloqueen la vialidad
- Los hospitales, estadios y estaciones de bomberos tampoco fueron tomados en cuenta, ya que de acuerdo al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF), este tipo de estructuras son estructuras tipo A. Es decir, son estructuras las cuales su funcionamiento es esencial en caso de emergencia

Una vez hechas estas consideraciones, con ayuda del programa *Google earth*, se hizo un recorrido virtual a lo largo de toda la red simplificada, para así poder elegir los edificios a evaluar. Una vez teniendo la lista de los edificios críticos, se tomaron las medidas necesarias para el análisis (e.j., ancho y alto). Además de edificios colapsados, también se tomaron en cuenta los puentes con mayor probabilidad de falla. La Tabla 3.8 muestra toda la infraestructura tomada en cuenta para el análisis y sus correspondientes valores geométricos, si es el caso. El valor k_v se fijó dependiendo el tipo de estructura que se tuviera, para edificios de concreto, 0.3 y para edificios de acero 0.7. A su vez, para el valor de c se utilizaron 15° .



Tabla 3.8 Valores geométricos

Infraestructura	Valores geométricos			
	Y (m)	W (m)	kv (%)	c (°)
Departamentos Tlalpan 2550	20.5	12	0.3	15
Departamentos Tlalpan 2332	18	9.8	0.3	15
Departamentos Tlalpan 2515	22	12	0.3	15
Hotel Real del Sur	30	43	0.3	15
Edificio comercial	10	35	0.3	15
Salón de fiesta infantiles	13	28	0.3	15
Edificio Telmex	25	45	0.3	15
Galerías Coapa (estacionamiento)	13	35	0.3	15
Galerías Coapa II	15	85	0.3	15
Super Plaza Miramontes	18	105	0.3	15
Hotel Mirasol	9	35	0.3	15
Colegio Aljibes	10	29	0.3	15
Orange Gym Tasqueña	11	20	0.3	15
Intersección “Viaducto Tlalpan-Periferico”	-	-	-	-
Paso elevado “Tlalpan”	-	-	-	-

Una vez conociendo la infraestructura tomada en cuenta y sus valores geométricos, se proseguirá a calcular los valores del ancho de los escombros provocados por colapso. Para llevar a cabo el análisis y saber si la vialidad se encontrará “bloqueada”, “libre” o “parcialmente bloqueada”, será necesario saber la distancia (W_i) del borde de la infraestructura, a la parte media de la vialidad más próxima a ella y la distancia (W_a) del borde de la infraestructura al inicio de la avenida.

El criterio que se utilizó para poder llevar a cabo el análisis fue el siguiente:

- Si $W_d < W_i$, entonces la vialidad se considerará “Libre”
- Si $W_d > W_i$, entonces la vialidad se considerará “Bloqueada”
- Si $W_d > W_a$, entonces la vialidad se considerará “Parcialmente Bloqueada”

Estas distancias también fueron medidas con ayuda del programa *Google Earth*. Dado que para cada edificio se tienen cuatro tipos de colapso, se tienen cuatro valores de W_d , por lo que se tomó el valor máximo de todos ellos, siendo el máximo el más crítico. Teniendo el valor máximo y la distancia W_i ,



se hace una comparación entre todas las distancias y se sabrá el estado de las vialidades en donde se encuentran los edificios analizados. Los resultados se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Distancias Wd y Wt

Infraestructura	Distancias Wd				Distancias			Estado
	A	B	C	D	Máx	Wt	Wa	
Departamentos Tlalpan 2550	11.5	14.4	11.6	5.1	14.4	12.0	4.0	Bloqueada
Departamentos Tlalpan 2332	10.1	12.4	10.0	4.5	12.4	12.7	4.3	PB
Departamentos Tlalpan 2515	12.3	15.1	12.2	5.5	15.1	11.5	4.3	Bloqueada
Hotel Real del Sur	10.7	25.8	22.2	7.0	25.8	13.0	5.0	Bloqueada
Edificio comercial	-	9.8	8.9	2.0	9.8	8.5	3.0	Bloqueada
Salón de fiesta infantiles	0.5	12.0	10.6	2.9	12.0	5.5	2.0	Bloqueada
Edificio Telmex	5.2	22.4	19.5	5.7	22.4	12.0	4.5	Bloqueada
Galerías Coapa (estacionamiento)	-	12.4	11.1	2.8	12.4	13.5	6.5	PB
Galerías Coapa II	-	15.4	14.4	2.4	15.4	18.5	12.0	PB
Super Plaza Miramontes	-	18.5	17.3	2.9	18.5	9.0	5.0	Bloqueada
Hotel Mirasol	-	8.9	8.2	1.7	8.9	11.0	4.5	PB
Colegio Aljibes	-	9.6	8.6	2.1	9.6	8.0	3.5	Bloqueada
Orange Gym Tasqueña	2.2	9.9	8.6	2.5	9.9	11.3	6.0	PB

*PB: Parcialmente bloqueada

Como podemos observar en la Tabla 3.9, prácticamente todos los edificios analizados bloquearían las vialidades en caso de un evento sísmico extremo. Las probabilidades de que esto ocurra son del 22 y 34 por ciento para zona II y zona III respectivamente. En la Tabla 3.10 se muestran las avenidas en donde se encuentran ubicados cada uno de los edificios y la respectiva zona en donde se alojan.

Tabla 3.10 Ubicación de los edificios críticos

Infraestructura	Vialidad	Zona
Departamentos Tlalpan 2550	Tlalpan	II
Departamentos Tlalpan 2332	Tlalpan	II
Departamentos Tlalpan 2515	Tlalpan	II
Hotel Real del Sur	Tlalpan	II
Edificio comercial	División del Norte	II
Salón de fiesta infantiles	División del Norte	III
Edificio Telmex	División del Norte	II
Galerías Coapa (estacionamiento)	Miramontes	III
Galerías Coapa II	Miramontes	III
Super Plaza Miramontes	Miramontes	II
Hotel Mirasol	Naval Militar	II
Colegio Aljibes	Miramontes	II
Orange Gym Tasqueña	Tasqueña	II



El siguiente tipo de bloqueo que se consideró, fue el de bloqueo por deterioros en la vialidad causados por el evento sísmico, pero las probabilidades de que esto ocurra son prácticamente cero. El último tipo de bloqueo, es el de bloqueo por falla en puentes. En la Tabla 3.10, se menciona el paso elevado de la intersección de Periférico y Viaducto-Tlalpan. Éste se encuentra ubicado en zona II, por lo que la probabilidad de que presente daños moderados es del 10 por ciento y por definición, esto significa que podrá presentar daños como rupturas y agrietamientos moderados en las columnas y agrietamientos en algunas conexiones y falla de las juntas. Todo este tipo de daños provocaría afectaciones en la red, ya que los flujos no serían continuos y la capacidad de esa vialidad disminuiría debido a los daños presentados.

Análisis de un segmento crítico en la red

La evaluación del segmento crítico, se llevó a cabo con ayuda del programa *PTV VISSIM*. Este programa permite hacer todo tipo de análisis y simulaciones respecto a flujos en redes. En un solo modelo permite representar a todos los usuarios de la vía pública y estudiar sus interacciones: autos, transporte de carga y cualquier tipo de transporte público. Además, con este software se pueden obtener tanto resultados numéricos detallados como animaciones en 3D representando diversos escenarios, lo que lo convierte en un recurso ideal para presentar propuestas de infraestructura tanto ante los agentes responsables de la toma de decisiones, como a la opinión pública, de forma comprensible y convincente. Por lo que este programa nos ayudará cumplir uno de los objetivos de este trabajo, el poder presentar cómo funciona la red antes y después de un evento sísmico. Este programa, permite simulaciones a nivel microscópico del tráfico, es decir, en pequeñas partes de la red, por lo que se eligió uno de los nodos críticos más importantes de la red para poder ser evaluado. Unas de las vialidades más importantes en toda la red, son Anillo Periférico y Viaducto Tlalpan, debido a la gran cantidad de coches que circulan por ellas todos los días. Esto puede apreciarse en el documento publicado por la Secretaria de Movilidad, SEMOVI [40] (antes SETRAVI) *Muestra de saturación en vialidades primarias en horas de mayor demanda*, en el que se mencionan las horas de mayor saturación vehicular (6:30 a 9:00 hrs., de 12:00 a 15:00 hrs., y de 18:30 a 21:30 hrs) y las vialidades más afectadas. En este mismo documento, al comparar todas las vialidades que se ven afectadas en las diferentes horas de mayor saturación, se observa que la intersección de Periférico y Viaducto Tlalpan muestra congestionamientos en los tres horarios, matutino, vespertino y nocturno (Figura 3.14).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.14 Saturación de vialidades en horario (a) matutino, (b) vespertino y (c) nocturno
Fuente: SEMOVI



En esta misma intersección, como ya se mencionó, se encuentra el paso elevado que podría presentar daños en caso de un evento sísmico. Además, aloja la zona de hospitales más grande de la red y una estación de bomberos, lo que la convierte en el punto más crítico e importante de la red. Estando ubicada la zona de hospitales y la zona de bomberos cerca de esta intersección, la convertirá en un receptor y emisor de grandes flujos de la red, ya que terminando el evento sísmico, de los servicios requeridos de mayor importancia, son los servicios médicos y los servicios de auxilio.

Condiciones actuales de la red vial urbana en la Ciudad de México

Debido a que el número de vehículos y las necesidades de transporte crecen a ritmo acelerado, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) muestra serios problemas de congestión vehicular en su red de transporte y es un problema que seguirá agravándose, constituyendo un peligro para la calidad de la vida urbana (Bull 2003). Deficiencias en el diseño geométrico, la falta de conservación de las vialidades, el uso intensivo de automóviles particulares, el estilo de conducción de los ciudadanos, la defectuosa información sobre las condiciones del tránsito y la inapropiada operación de los sistemas de control, son algunas causas que fomentan la congestión vehicular (Bull 2003).

Thompson y Bull (2002) definen de manera formal la congestión como: “La condición que prevalece si la introducción de un vehículo en un flujo de tránsito aumenta el tiempo de circulación de los demás”. Por otro lado, Ortuzar y Willumsen (1994), consideran que la congestión surge cuando la demanda de transporte se acerca a la capacidad de la infraestructura instalada y debido a ello, el tiempo de tránsito aumenta a un valor mucho mayor que cuando se presentan condiciones de baja demanda vehicular.

En la actualidad la congestión y la saturación de las vialidades, entre otros factores, han producido un aumento sustancial de los tiempos promedio de viaje. Se calcula que en 2007 el tiempo promedio de viaje de los habitantes del D.F. era de 53 minutos y que en 2009 aumentó a 1 hora 21 minutos (Tarriba y Alarcón 2012). A su vez, el Gobierno del Distrito Federal (GDF) reporta en el Programa Integral de Movilidad 2013-2018 que la ciudad cuenta actualmente con una red vial total de 10,403.44 km de longitud, de la cual el 10.73% corresponde a vialidades primarias y el 89.27% pertenece a vialidades secundarias. Este mismo documento, reporta que el 85% del espacio vial es utilizado por vehículos particulares y el 15% restante lo utiliza el transporte público. No obstante, los taxis ocupan dos terceras partes de este último, por lo que encontramos un uso ineficiente del espacio vial, ya que los vehículos ocupan quince veces más espacio que el transporte público, pero satisface solamente el 30% de los viajes (GDF, 2014).



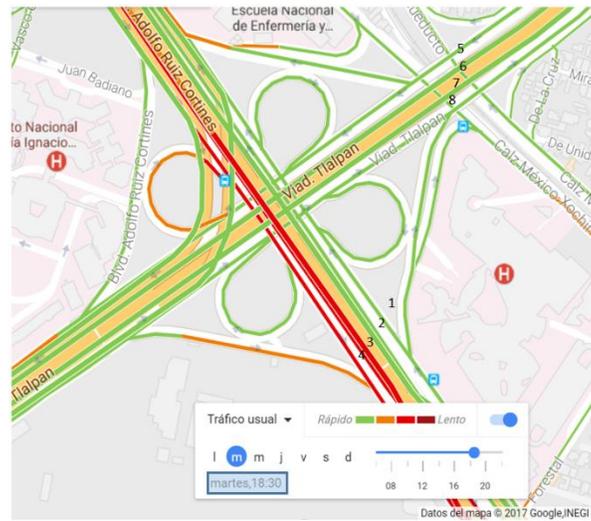
El primer paso para llevar a cabo el análisis, es el saber cómo funciona la intersección en condiciones normales (e.j. antes del evento sísmico), esto se llevará a cabo en función del concepto de nivel de servicio. Éste es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación de un flujo vehicular, y de su percepción por los pasajeros (Cal y Mayor, y Cárdenas 2007). Para esto, se llevó a cabo un “aforo virtual” debido a la falta de información y de recursos necesarios para poder realizar un aforo físico.

La metodología que se llevó a cabo fue, obtener el nivel de servicio en el horario nocturno, ya que es el que presenta mayores congestionamientos. El nivel de servicio se obtuvo con ayuda del programa *Google Maps* y su aplicación de tráfico, el cual muestra el nivel de congestionamiento que se presenta de lunes a domingo en horarios de las 06:00 am a las 10:00 pm. Dependiendo el nivel de congestionamiento, el programa muestra un color diferente, siendo un total de cuatro colores. De acuerdo al Nuevo Reglamento de Tránsito de la Ciudad de México, la velocidad máxima para vías de acceso controlado, como Periférico y Viaducto Tlalpan, será de 80 km/h y para sus laterales de 40 km/h. Así, para cada color se asignó una velocidad promedio de coches tal como se muestra en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Velocidades asignadas a cada tipo de congestionamiento

Carriles centrales (km/h)		Laterales (km/h)	
	80		40
	65		30
	50		20
	35		10

Una vez definidos los colores, se hizo un análisis de velocidades promedio en un horario nocturno en los días martes, miércoles y jueves. La Figura 3.15 muestra un ejemplo que cómo se realizó el análisis.



		MARTES (km/h)						
Número	Vialidad	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30
1	Lateral Periférico	40						
2	Periférico	80						
3	Periférico	50						
4	Lateral Periférico	20						
5	Lateral Viaducto Tlalpan	40						
6	Viaducto Tlalpan	80						
7	Viaducto Tlalpan	80						
8	Lateral Viaducto Tlalpan	40						

Figura 3.15 Ejemplo de metodología seguida

Dependiendo el color mostrado en *Google Maps*, se fue llenando la tabla con los respectivos valores de cada segmento, se enumeraron los segmentos según la figura. Se repitió la metodología para poner llenar la tabla y obtener una velocidad promedio de cada segmento en cada horario y cada día. Teniendo todas las velocidades, se hizo un promedio total de todas las velocidades obtenidas.

Los niveles de servicio se designaran de acuerdo a la velocidad y a la relación volumen capacidad. Donde el volumen es el número de vehículos que pasan por un punto durante un tiempo específico. Y la capacidad, es el número máximo de vehículos que pueden pasar por un punto durante un tiempo específico. La Tabla 3.12 muestra los valores asignados a cada nivel de servicio.

Tabla 3.12 Niveles de servicio

Nivel de Servicio	Relación volumen capacidad	Velocidad 80 km/h	Velocidad 40 km/h
A	0.6	80	40
B	0.7	79 – 70	39 – 30
C	0.8	69 – 60	29 – 20
D	0.9	59 – 50	19 – 10
E	1	<50	<10



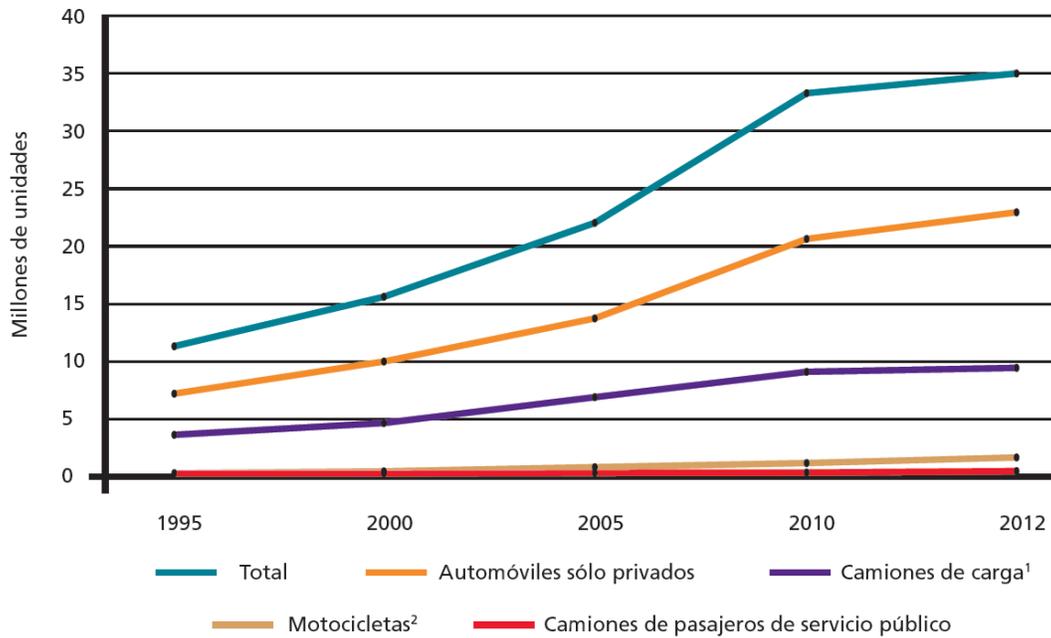
Con todos los parámetros definidos, podremos obtener los volúmenes de cada segmento de la red. Dependiendo la velocidad promedio que presentaron durante el aforo virtual realizado, se asignará un nivel de servicio y por lo tanto una relación de volumen capacidad. El manual de proyecto geométrico de carretas de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes 1991, la capacidad de vehículos de una vialidad como Periférico y Viaducto Tlalpan es de 2000 vehículos por hora bajo condiciones ideales. En Tabla 3.13 se muestran los resultados de los flujos obtenidos.

Tabla 3.13 Flujos obtenidos

Número	Vialidad	Flujo (veh/h)
1	Lateral Periférico	1600
2	Periférico	1600
3	Periférico	1400
4	Lateral Periférico	1400
5	Lateral Viaducto Tlalpan	1400
6	Viaducto Tlalpan	1400
7	Viaducto Tlalpan	1800
8	Lateral Viaducto Tlalpan	1600

Una vez teniendo los flujos de las condiciones normales, se empezó a modelar la intersección en el programa. Las consideraciones que se tuvieron para realizar el modelo son las siguientes:

- Ancho de los carriles en carriles centrales de las dos vialidades de 3.5 m y para las vías de acceso 3 m
- Se estableció una composición de vehículos ligeros y vehículos pesados. Los porcentajes de cada uno de ellos, se tomaron del Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México 2014-2015 donde muestra una gráfica (Figura 3.16) que representa el parque vehicular registrado de 1995-2012. De ahí se obtuvieron porcentajes de vehículos ligeros y pesados, con 70 por ciento y 30 por ciento respectivamente.



Notas 1. Incluye el total de camiones de uso público, oficial y particular.
2. Incluye motocicletas de alquiler y de uso oficial y particular.

Figura 3.16 Parque vehicular registrado de 1995-2012

Fuente: INEGI, Anuario Estadístico y Geográfico de los Estados Unidos Mexicanos (México, 2013)

- Se fijaron velocidades máximas para carriles centrales y carriles laterales. En carriles centrales, se fijó una velocidad de 80 km/h y en las laterales, se fijó una velocidad máxima de cuarenta kilómetros por hora, de acuerdo al nuevo reglamento de tránsito de la Ciudad de México
- Se agregaron *Priority Rules* en las entradas o intersecciones con las vialidades, considerando que cada vehículo se detiene un mínimo de tres segundos antes de entrar a la vialidad destino y que requiere de 5 metros para poder tener acceso a la vía de destino
- Dado que existen diferentes rutas que un vehículo, se fijaron *Static Vehicle Routes* para cada segmento de la red. En la Figura 3.17 se muestra un ejemplo de todas las rutas que puede elegir un vehículo proveniente de Periférico dirección Poniente. Se repitió la metodología para todos los segmentos

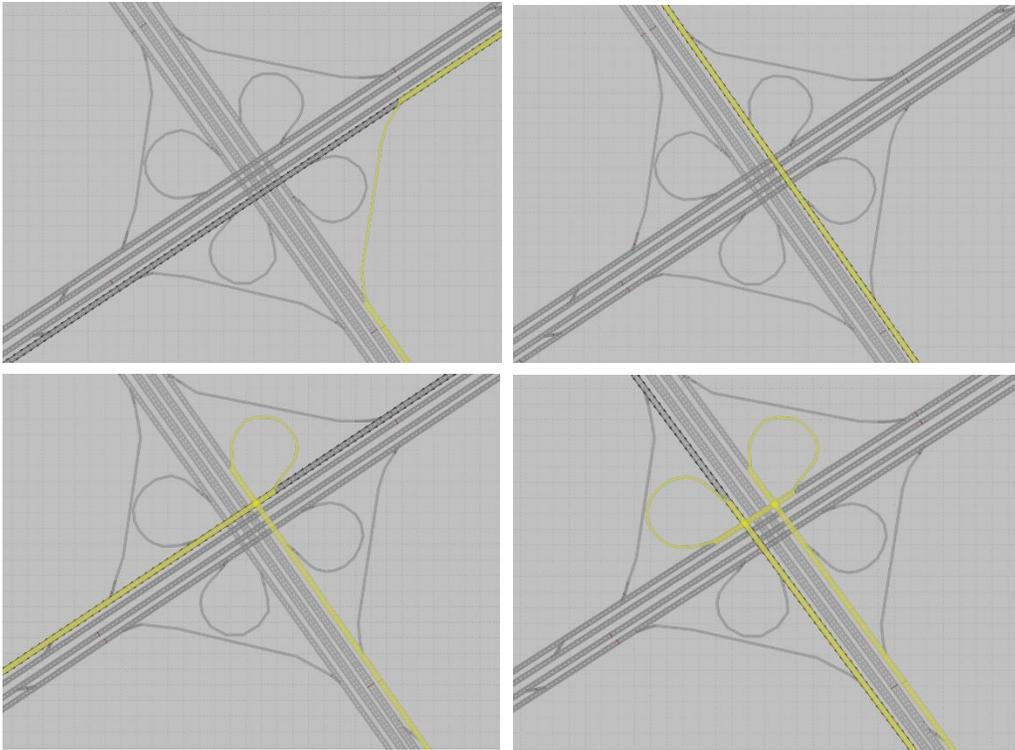


Figura 3.17 Posibles rutas de un vehículo proveniente de Periférico dirección Norte

- Se modeló el paso a elevado con sus respectivas entradas y salidas como se muestra en la Figura 3.18.

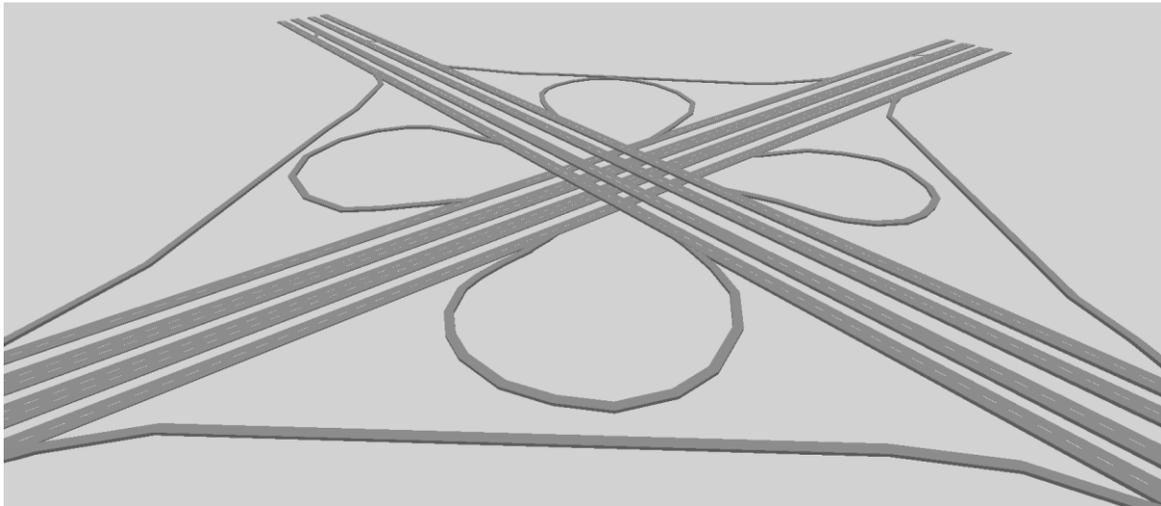


Figura 3.18 Modelo 3D del paso elevado



Una vez terminado el modelo, se hizo una simulación de 600 segundos y se obtuvieron resultados sobre las velocidades que presentó cada segmento. El programa nos da resultados en intervalos de tiempo, se propuso un lapso de 100 segundos. Por lo tanto, se obtuvieron resultados de 0-100, 100-200, 200-300, 300-400, 400-500 y 500-600 segundos. En los primeros segundos de la simulación, la vialidad se encuentra completamente vacía y los coches empiezan a distribuirse por las vialidades. Dado que estos primeros segundos no son representativos, se eligió el lapso de 300-400 segundos para obtener resultados acerca de las velocidades que presentó cada segmento de la vialidad. La Tabla 3.14 muestra las velocidades promedio que se presentaron y el nivel de servicio correspondiente.

Tabla 3.14 Velocidades promedio en condiciones normales

Número	Segmento	Velocidad Promedio (km/h)	Nivel de Servicio
1	Periférico-INE	71	B
2	Periférico- INR	73	B
3	VD-INE	67	C
4	VD-INC	68	C
5	Lateral VD- INC	36	B
6	Lateral VD- INE	37	B
7	Lateral P-INR	39	B
8	Lateral P-INC	38	B

Terminada la simulación en condiciones normales, se hizo una con condiciones de bloqueo para los segmentos de Viaducto Tlalpan, ya que son los correspondientes al paso elevado. Dados los daños que puede presentar el puente, se consideró que podría bloquearse un carril de cada segmento de Viaducto Tlalpan. Hechas estas consideraciones, se volvió a correr el modelo. Los resultados se muestran en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15 Velocidades promedio con condiciones de bloqueo

Número	Segmento	Velocidad Promedio (km/h)	Nivel de Servicio
1	Periférico-INE	65	C
2	Periférico-INR	67	C
3	VD-INE	40	E
4	VD-INC	38	E
5	Lateral VD- INC	30	B
6	Lateral VD- INE	26	C
7	Lateral P-INR	31	B
8	Lateral P-INC	35	B



Como podemos observar en las tablas anteriores, la mayoría de los segmentos sufrirán de afectaciones en la continuidad del flujo, ya que sus velocidades promedio bajan y por lo tanto, su nivel de servicio. Este tipo de afectaciones provocarán aumentos en los tiempos de traslado y con ello, la llegada de los equipos de emergencia. Dado los alcances de este trabajo, solamente se analizó un segmento crítico, pero a lo largo de la red también podrán presentarse otros tipos de bloqueo, lo que también generará afectaciones a la circulación. Todas estas consideraciones deben ser tomadas en cuenta en un solo sistema, ya que al ser una red, cualquier tipo de afectación que sufra un segmento de ella, afectará a los segmentos aledaños y se verá reflejado en conjunto en el rendimiento de la red.

Por definición, la resiliencia sísmica es la capacidad de respuesta de una ciudad para recuperarse de los efectos sísmicos de manera oportuna y eficiente, mediante la rehabilitación de sus estructuras y funciones básicas. Dado que la llegada oportuna de equipos de emergencia, como ambulancias y equipos de bomberos son fundamentales para que una ciudad pueda recuperarse después de un sismo, la resiliencia sísmica se ve afectada tras el bloqueo de varios segmentos en la red. Y en sí, la resiliencia de la infraestructura de transporte puede representarse como la capacidad que tiene el sistema de cumplir con su objetivo durante y después de un evento sísmico, por lo que ésta se verá afectada dados los daños que se presentaran en la red. En este trabajo, se identificaron las partes más vulnerables de la red, lo cual podrá servir para realizar estrategias de mitigación de riesgo y así poder mejorar la resiliencia del sistema.



4. CONCLUSIONES

Este trabajo describe la aplicación de una metodología novedosa para evaluar la resiliencia sísmica en redes de transporte. La metodología consiste en seis pasos: 1) Definición de la zona de estudio e identificación de infraestructura estratégica, 2) Definición y selección de curvas de fragilidad específicas para evaluar la infraestructura crítica, 3) Planteamiento de la red simplificada, 4) Cálculo del riesgo sísmico, 5) Evaluación de la probabilidad de falla y 6) Evaluación de la pérdida de la conectividad y afectaciones a la resiliencia. Esta metodología nos permitió identificar las zonas más vulnerables del sistema, las cuales presentan probabilidades de ocurrencia que van del 22 al 34 por ciento, dependiendo de la zona en la que se encuentren. Además, se hizo una evaluación específica, en uno de los nodos de mayor importancia, el cual aloja una gran zona de hospitales y una estación de bomberos, los cuales son fundamentales para la recuperación después de un sismo. En esta evaluación pudieron observarse las afectaciones que ésta presentará, que son aumentos en los tiempos de traslado y baja en el nivel de servicio, lo que conllevará un atraso a la llegada de los equipos de rescate a otras zonas de la ciudad.

Dado los alcances de este trabajo, solamente se analizó un segmento crítico, pero a lo largo de la red también podrán presentarse otros tipos de bloqueo, lo que también generará afectaciones a la circulación. Todas estas consideraciones deben ser tomadas en cuenta en un solo sistema, ya que al ser una red, cualquier tipo de afectación que sufra un segmento de ella, afectará a los segmentos aledaños y se verá reflejado en conjunto en el rendimiento de la red.

En este trabajo se identificaron y priorizaron las zonas más críticas del sistema, lo cual es un paso elemental para poder crear un sistema efectivo de mitigación del riesgo, que ayudará a mejorar la resiliencia del sistema ante un evento sísmico. Además, esta información facilita la realización de acciones dirigidas a la creación e implementación de estrategias que combatan los daños ocasionados por sismos y fortalecen las capacidades de resiliencia de la ciudad.

Todo esto sólo forma parte de un pequeño paso para poder llevar a cabo una evaluación de la resiliencia y la mejora de ella. Además de todo esto, se deberán tomar en cuenta diferentes aspectos:

- Se deberá exigir un gobierno local incluyente, competente y responsable que destine los recursos necesarios para poder llevar a cabo los sistemas de mitigación de riesgo, ya que como se mencionó anteriormente, todos los planes de mitigación, conllevan recursos financieros y humanos para poder llevarse a cabo



-
-
- Establecer tareas específicas a cada elemento capaz de brindar ayuda ante un evento desfavorable para que todos los organismos comprendan su papel y la contribución que pueden hacer en la reducción del riesgo
 - Mantener información actualizada sobre las amenazas y las vulnerabilidades, generar evaluaciones del riesgo y utilizarlas como base para los planes de contingencia, estos planes deberán de estar disponibles a todo el público y ser divulgados con la finalidad de que los ciudadanos puedan aplicarlos ante una emergencia
 - Invertir y mantener infraestructuras con diseños bien concebidos, capaces de hacer frente a las amenazas de la zona
 - Realizar programas educativos y de capacitación sobre la reducción del riesgo ante eventos sísmicos, tanto en escuelas como en comunidades y oficinas
 - Instalar sistemas de alerta temprana y llevar a cabo simulacros con regularidad, para la preparación del público en general



REFERENCIAS

- Soberón, G; Frenk, J; Sepúlveda, J (1 de junio de 1986). The health care reform in Mexico: before and after the 1985 earthquakes. *American Journal of Public Health* 76 (6): 673-680. ISSN 0090-0036. PMC 1646758. PMID 3706595. Consultado el 14 de septiembre de 2015.
- Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, Reglamento publicado en Gaceta Oficial del Distrito Federal, el 29 de enero de 2004. Última reforma publicada en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México el 17 de junio de 2016.
- Timmerman P. Vulnerability. Resilience and the collapse of society: a review of models and possible climatic applications. Canada: Environmental Monograph, Institute for Environmental Studies, Univ. of Toronto; 1981.
- Pimm S. The complexity and stability of ecosystems. *Nature* 1984; 307 (5949):321–6.
- Weili Zhang, Naiyu Wang. Resilience-based risk mitigation for road networks. *Structural Safety* 62 (2016) 57–65.
- Bruneau M, Chang S, Eguchi R, Lee G, O'Rourke T, Reinhorn AM, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra* 2003; 19(4):733–52.
- Chang S, Shinozuka M. Measuring improvements in the disaster resilience of communities. *Earthquake Spectra* 2004; 20(3):739–55.
- Kostoglodov y Pacheco 1999. Cien años de sismicidad en México. Geofísica UNAM.
- Bitrán Daniel, (2001), Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-991. CENAPRED, pp. 46-51.
- Hardin, B., y Drnevich, V., Shear modulus and damping in soil, Measurements and parameters effects. *Journal of SMF Div., Proc., ASCE, Vol.98, No.SM6, 1972.*
- Vucetic, R., y Dobry, R., Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 1, USA, 1991.*
- UNISDR, The United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 1999.
- Estrategia de Resiliencia de la CDMX: Transformación adaptativa, incluyente y equitativa. Oficina de Resiliencia CDMX. Septiembre 2016.
- HAZUS-MH: technical manuals. Washington, DC: Federal Emergency Management. Agency and National Institute of Building Science; 2004.
- Argyroudis S, Pitilakis K. Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits. *Soil Dynamics Earthq Eng* 2012; 35: 1–12.
- Esteva, L. Criteria for the construction of spectra for seismic design, 3rd Pan-American Symposium of Structures, Caracas, Venezuela; 1967, 3-8 July.



- Cornell, C. A. Engineering seismic risk analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America* 1968; 58: 1583-1606.
- Trifunac, M. D. y Lee, V. W. Direct Empirical Scaling of Response Spectral Amplitudes from Various Site and Earthquake Parameters. Report NUREC/CR 4903. U.S. Nuclear Regulatory Commission 1, 1987; 341 pp.
- Argyroudis S, Kaynia AM, Pitilakis K. Development of fragility functions for geotechnical constructions: application to cantilever retaining walls. *Soil Dyn Earthq Eng* 2013; 0: 106–16.
- Klügel Jens-Uwe. 2008. Seismic hazard analysis. *Earth-Science Reviews* 0012-8252; 88(1 2):1-32.
- Karamlou A, and Bocchini P (2015) Computation of bridge seismic fragility by large-scale simulation for probabilistic resilience analysis, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, DOI: 10.1002/eqe.2567.
- Dong Y, and Frangopol DM (2015) Risk and resilience assessment of bridges under mainshock and aftershocks incorporating uncertainties, *Engineering Structures*, 83, 198-208.
- Venkittaraman A, and Banerjee W (2013) Enhancing resilience of highway bridges through seismic retrofit, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, DOI: 10.1002/eqe.2392
- Pejovic J, and Jankovic S. 2016. Seismic fragility assessment for reinforced concrete high-rise buildings in Southern Euro-Mediterranean zone, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14 : 185-212.
- Kiani, A, Mansouri B and Moghadam, A.S. 2016. Fragility curves for typical steel frames with semi-rigid saddle connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 118 : 231-242
- Pitilakis, K, Crowley, H and Kaynia A.M. 2016. Syner-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk. Editors. *Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities*.
- Argyroudis S, Selva J, Gehl P and 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.
- Mayoral JM, Badillo A, Alcaraz JM, 2016. Vulnerability assessment and resilience assesment of an enhanced urban overpass foundation. Submitted to the *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Rosenblueth E., Modelos probabilísticos de la ocurrencia de temblores, *Memorias del Simposio Generación, Propagación y Efectos de Temblores*, Abril, 1987.
- Bolt B. A., *Causes of Earthquakes* en Wiegel, R. L. Ed. *Earthquake*, 1970.
- Norris C. H., *Structural Design for Dynamic Loads*, Ed. Mc Graw Hill, New York, 1959.
- Hardin, B., y Drnevich, V., Shear modulus an damping in soil, Measurements and parameters effects. *Journal of SMF Div., Proc., ASCE*, Vol.98, No.SM6, 1972.



ONU 2015. Cómo desarrollar ciudades más resilientes. Un manual para líderes de los gobiernos locales.

Bull Alberto. Congestión de tránsito. El problema y cómo enfrentarlo. CEPAL. Chile, 2003.

Tarriba Gabriel y Alarcón Gabriela. Movilidad competitiva en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: Diagnóstico y soluciones factibles. Instituto Mexicano para la Competitividad. México, 2012.

GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. Programa Integral de Movilidad. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México D.F., 2014.

Thompson, Ian y BULL, Alberto. Urban Traffic congestion: its economic and social causes and consequences. CEPAL. Chile, 2002.

Ortuzar, Juan y Willumsen, Luis. Modelos de transporte. Universidad de Cantabria. Madrid, 2008.

Cal y Mayor R., Cárdenas G. James. Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y aplicaciones. 8ª edición. Editorial: Alfaomega.

ONU-Hábitat. Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México 2014-2015. Gobierno de la República