

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Doctorado en Ciencias e Ingeniería

**“La vulnerabilidad de edificaciones habitacionales asociada al riesgo
sísmico en el Noroeste de Baja California”**

TESIS

que para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

FRANCISCO DAMIÁN DÍAZ GUZMÁN

Ensenada Baja California, México, a enero de 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

**LA VULNERABILIDAD DE EDIFICACIONES HABITACIONALES
ASOCIADA AL RIESGO SÍSMICO EN EL NOROESTE DE BAJA
CALIFORNIA**

TESIS

Que para obtener el grado de Doctor en Ciencias presenta:

Francisco Damián Díaz Guzmán

Aprobada por:

Dra. Dora Luz Flores Gutiérrez
Directora de tesis

Dr. Mario González Durán
Co-director de tesis

Dr. Álvaro Alberto López Lambrano
Miembro del comité

Dr. Ulises Mena Hernández
Miembro del comité

Dra. Mariana Villada Canela
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Enero de 2024

Resumen de la tesis de Francisco Damián Díaz Guzmán, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS del programa Doctorado en Ciencias e Ingeniería de la UABC. Ensenada Baja California, México, a enero de 2024.

LA VULNERABILIDAD DE EDIFICACIONES HABITACIONALES ASOCIADA AL RIESGO SÍSMICO EN EL NOROESTE DE BAJA CALIFORNIA

Resumen aprobado por:

Dra. Dora Luz Flores Gutiérrez
Directora de tesis

Dr. Mario González Durán
Codirector de tesis

Este trabajo de tesis fue realizado en el norte del estado de Baja California, en una de las regiones con más alto riesgo sísmico en México, de acuerdo a la regionalización realizada por el manual de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y validado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Este estudio es importante porque la ciudad de Tijuana concentra más del 50% de la población del estado, siendo la más poblada, con un total de 1 922 523 habitantes y 576 708 viviendas.

La vivienda es la infraestructura más predominante en la ciudad de Tijuana. Por ello, es relevante comprender el comportamiento dinámico de este tipo de estructuras. A pesar de que la literatura regional describe comportamientos genéricos, se carece de estudios formales que propongan comportamientos específicos en términos de desplazamientos generados, cortantes máximos, estados de daño y valores de distorsión en la región.

La vulnerabilidad es uno de los componentes del riesgo sísmico, expresada en términos de funciones que asocian medidas de intensidad y valores de pérdidas económicas y afectaciones humanas. Utilizando el *Vulnerability Modeller's ToolKit* (VMTK), se desarrollaron los siguientes módulos para obtener las funciones: (i) selección de registros de movimiento del suelo, (ii) definición de capacidad estructural, (iii) análisis dinámicos no lineales en osciladores de grado único de libertad (SDOF) para estimar la respuesta del edificio a cargas sísmicas, (iv) conversión de los resultados de los análisis dinámicos en funciones de fragilidad, (v) derivación de funciones de vulnerabilidad y (vi) comparación y verificación de resultados.

Se obtuvieron las funciones de fragilidad para niveles de diseño sísmico bajo, moderado y alto y se encontró la probabilidad de alcanzar o superar los distintos estados de daños (leve, moderado, extenso y completo) en las viviendas de baja altura (1-3 pisos) para un valor esperado de 0.50 g de aceleración máxima del suelo (PGA) y en las viviendas de mediana altura (4-7 pisos) para un valor esperado de 0.5 g de aceleración espectral (SA), considerando un periodo de la estructura de 0.5 segundos ($T=0.5s$). Se derivaron las funciones

de vulnerabilidad y se determinó que para un nivel de diseño sísmico bajo las estructuras de baja y mediana altura presentan un 30% y 44% de probabilidad de índice de pérdida para un valor esperado de 0.50 g de PGA y SA ($T=0.5s$) respectivamente.

Al utilizar datos característicos de la zona de interés, las funciones de fragilidad y vulnerabilidad propuestas en este trabajo se pueden emplear para la estimación de daños y pérdidas en escenarios de riesgo, y de esta manera disminuir la incertidumbre en los cálculos de análisis de riesgo en la ciudad de Tijuana.

Palabras clave: Mampostería; ingeniería sísmica; análisis estructural; función de fragilidad; función de vulnerabilidad.

DEDICATORIA

Gracia a **Dios**, quien me ha guiado y fortalecido a lo largo de esta travesía académica.

“Confía en el Señor con todo tu corazón, no dependas de tu propio entendimiento. Busca su voluntad en todo lo que hagas, y él te mostrara cual camino tomar.” Proverbios 3:5-6 NTV

A mi amada esposa **Patty ♥**, y a mis hijos **Aarón** y **Oliver**, quienes siempre me han brindado su amor y apoyo incondicional. Ellos son mi mayor fuente de inspiración y motivación en todo momento.

A mis padres, por su inquebrantable apoyo y enseñanzas que han forjado el camino hacia este logro.

A toda mi familia, cuyo aliento y comprensión han sido fundamentales en cada paso de este viaje.

Este trabajo no solo es mío, sino de cada uno de ustedes que ha contribuido a mi crecimiento personal y académico. Con profundo agradecimiento, dedico este logro a quienes han sido mis pilares fundamentales.

“No quiero decir que ya haya logrado estas cosas ni que ya haya alcanzado la perfección; pero sigo adelante a fin de hacer mía esa perfección para la cual Cristo Jesús primeramente me hizo suyo. No, amados hermanos, no lo he logrado, pero me concentro únicamente en esto: olvido el pasado y fijo la mirada en lo que tengo por delante, y así avanzo hasta llegar al final de la carrera para recibir el premio celestial al cual Dios nos llama por medio de Cristo Jesús.” Filipenses 3:12-14 NTV

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
 CAPÍTULO 1	 1
1.INTRODUCCIÓN	1
1.1. Impacto de desastres naturales	1
1.2. Regionalización sísmica en México	3
1.3. Antecedentes	4
1.4. Justificación.....	8
1.5. Planteamiento del problema	9
1.6. Objetivos	9
1.7. Hipótesis.....	10
1.8. Marco teórico	10
1.8.1 Exposición	10
1.8.2 Peligro sísmico	10
1.8.3 Vulnerabilidad sísmica	13
1.8.4. Métodos empíricos para la evaluación de la vulnerabilidad	15
1.8.5. Métodos analíticos para la evaluación de la vulnerabilidad.....	18
 CAPÍTULO 2	 23
2. METODOLOGÍA	23
2.1. Introducción	23
2.2. Vulnerabilidad sísmica	23
2.3. Elementos expuestos	24
2.3.1. Información del inventario en Tijuana.....	25
2.3.2. Clasificación de construcciones en viviendas de mampostería.....	29
2.4. Peligro sísmico	33

2.4.1. Caracterización de las fuentes sísmicas	33
2.4.2. Caracterización de la sismicidad	34
2.4.3. Ecuaciones predictivas de movimiento de suelos	35
2.4.4. Ecuación de peligro sísmico	36
2.5. Vulnerability Modeller's ToolKit (VMTK).....	38
2.5.1. Modulo de demanda	38
2.5.2. Modulo de capacidad.....	39
2.5.3. Modulo de respuesta estructural	39
2.5.4. Modulo de fragilidad	39
2.5.5. Modulo de vulnerabilidad.....	39
2.5.6. Modulo de comparación y verificación de resultados	40
 CAPÍTULO 3	 41
3. RESULTADOS	41
3.1 Peligro sísmico	41
3.1.1. Fuentes Lineales	41
3.1.2. Sitios de interés.....	42
3.1.3. Distribución de probabilidad de distancia	43
3.1.4. Distribución de probabilidad de magnitud.....	44
3.1.5. Desagregado de peligro sísmico para la estación PCI	44
3.1.6. Espectro de peligro uniforme para la estación PCI.....	46
3.1.7. Selección del registro de diseño para la Estación PCI.....	47
3.2 Fragilidad y vulnerabilidad sísmica	51
3.2.1. Selección de registros de movimientos de suelo.....	51
3.2.2. Curvas de capacidad	52
3.2.3. Respuesta estructural	54
3.2.4. Definición de criterios de daño.....	56
3.2.5. Derivación de funciones de fragilidad	57
3.2.6. Funciones de vulnerabilidad.....	60

CAPÍTULO 4	63
4. DISCUSIONES.....	63
4.1. Comparación de resultados en la región.....	63
4.2. Comparación de resultados a nivel internacional	67
 CAPÍTULO 5	 70
5. CONCLUSIONES	70
REFERENCIAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Número de desastres reportados por país durante el periodo de 2000-2019 (CRED, 2020).	1
Figura 1.2. (a) Porcentaje de personas afectadas, (b) Número de personas afectadas por diferentes tipos de desastres (Otros: temperaturas extremas, actividad volcánica, deslizamientos e incendios), durante el periodo de 2000-2019 (CRED, 2020).	2
Figura 1.3. (a) Porcentaje de personas muertas, (b) Número de decesos por diferentes tipos de desastres (Otros: sequías, deslizamientos, actividad volcánica y movimientos de masas), durante el periodo de 2000-2019 (CRED, 2020).	3
Figura 1.4. Regionalización Sísmica de la República Mexicana. La zona A (Intensidad sísmica baja): $PGA=a0r < 50\text{cm/s}^2$. La zona B (Intensidad sísmica moderada): $PGA=50 \leq a0r < 100\text{cm/s}^2$. La zona C (Intensidad sísmica alta): $PGA=100 < a0r < 200\text{cm/s}^2$. La zona D (Intensidad sísmica muy alta): $PGA=a0r \geq 200\text{cm/s}^2$ (Godínez-Domínguez et al., 2021).	4
Figura 1.5. Registros sísmicos en México 1980-2017 de magnitudes igual y mayores a 6.	4
Figura 1.6. Organización geográfica de la región de interés.	5
Figura 1.7. Eventos sísmicos y fallas del sur de California y noroeste de México. (a) Eventos instrumentales. (b) Eventos históricos (Díaz et al., 2023a).	6
Figura 1.8. Estimación del riesgo sísmico, Adaptada de (Boissonnade & Shah, 1984).	6
Figura 1.9. Indicadores de Riesgo en México, (a) Pérdidas anuales promedio, (b) Regiones de mayor riesgo sísmico (OpenQuake, 2019).	9
Figura 1.10. Localización y características de estructuras (Crowley, 2014).	10
Figura 1.11. Pasos involucrados en DSHA. Paso 1. Se identifican las fallas en las cercanías del sitio que pueden causar terremotos. Paso 2. Se predice la magnitud máxima de los terremotos de cada una de estas fuentes. Paso 3. Seleccione el terremoto de control para el sitio, es decir, qué terremoto tiene el efecto más severo (generalmente PGA) en el sitio. Paso 4. Especifique el PGA, PGV u otra medida que describa el efecto del terremoto para el sitio en consideración.(Bhattacharya et al., 2019).	12
Figura 1.12. Pasos involucrados en PSHA. Paso 1. Identificar la fuente de posibles terremotos y representar gráficamente. Paso 2. Evaluar la sismicidad de las fuentes de terremotos a partir de la relación de recurrencia. Paso 3. Desarrollar los modelos de atenuación del movimiento del suelo. Paso 4. Mediante la integración de modelos, genere las curvas de peligro sísmico que expresen la probabilidad de exceder varios niveles de movimiento del suelo dentro de un período de tiempo.(Bhattacharya et al., 2019).	13
Figura 1.13. Representación típica de formulaciones de (a) fragilidad y (b) vulnerabilidad, adaptado de (Yamin et al., 2017).	14
Figura 1.14. Métodos empíricos y analíticos para la evaluación de la vulnerabilidad.	15
Figura 1.15. Métodos analíticos del programa RMTK para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica (V. Silva et al., 2015).	19

Figura 1.16. Ejemplos de estructuras de mampostería no reforzada de Antioquia Colombia (Acevedo et al., 2017).....	21
Figura 2.1. Esquema de pasos para obtener las funciones de vulnerabilidad, Adaptado de (V. Silva et al., 2014).....	24
Figura 2.2. Distribución del inventario de vivienda según la construcción más común (Romero, 2020).	25
Figura 2.3. Viviendas típicas de mampostería de la ciudad de Tijuana (1 a 5 pisos).	26
Figura 2.4. Porcentaje de los diferentes tipos de viviendas en la ciudad de Tijuana (Díaz et al., 2023a).....	27
Figura 2.5. Porcentaje de viviendas para las diferentes alturas en la ciudad de Tijuana (Díaz et al., 2023a)..	28
Figura 2.6. Porcentaje de viviendas en términos de años de construcción de Tijuana (Díaz et al., 2023a).....	28
Figura 2.7. Encuesta virtuales en Mapa Digital de México para determinar área de viviendas.	29
Figura 2.8. Construcción de mampostería confinada: a) requisitos para mampostería confinada (NTCBC, 2017), y b) secuencia constructiva de vivienda de mampostería confinada en Baja California. ..	30
Figura 2.9. Construcción de mampostería reforzada: a) requisitos para mampostería reforzada (NTCBC, 2017), y b) secuencia constructiva de vivienda de mampostería reforzada en Baja California. ...	31
Figura 2.10. Daño de viviendas de mampostería confinada mal construido en el terremoto de Mexicali BC de 2010; esto se considera un rendimiento no dúctil (Martinez & Martinez, 2010).....	31
Figura 2.11. Diagrama de la determinación de la distribución de probabilidad de distancia para una fuente lineal (Arce, 2016).	34
Figura 2.12. Distribución de probabilidades de que $R=r$, del ejemplo de la Figura 3.3 (Arce, 2016).	34
Figura 3.1. Fuentes lineales consideradas en el análisis de peligro sísmico.	41
Figura 3.2. Sitios de interés de la ciudad de Tijuana, son ubicaciones de estaciones que conforman la Red Acelerométrica de Tijuana. Estaciones, PR=Presa Abelardo L. Rodríguez, TUN=Tanque Aguaje de la Tuna, COL= Tanque Cerro Colorado, PLA= Planta de Tratamiento Playas, PCI= Terreno Protección Civil y CCC=Centro Control, Comando y Computo de la Policía.	43
Figura 3.3. Curvas de peligro sísmico de aceleración espectral, para la estación PCI ubicada en Tijuana. a) Tasa anual de excedencia del parámetro de aceleración espectral. b) Probabilidad de excedencia de la aceleración espectral.	44
Figura 3.4. Desagregado de peligro sísmico en el sitio de la estación PCI. Las líneas verticales representan la contribución al peligro de cada uno de los segmentos de falla considerados. Mientras más larga sea la longitud de estas líneas, mayor es la contribución al peligro.	45
Figura 3.5. Contribución al peligro sísmico total de todos los segmentos de falla considerados.	46
Figura 3.6. Espectro de aceleración de peligro sísmico uniforme para el sitio donde se ubica la estación PCI.	47
Figura 3.7. Espectro de respuesta de los registros de la tabla 3.4 comparados con el espectro de peligro sísmico uniforme para el sitio donde se ubica la estación PCI.	48
Figura 3.8. Espectros de respuesta para registros de movimientos de suelo seleccionados para la ciudad de Tijuana.	52

Figura 3.9. Ejemplo curva de capacidad de edificación del manual HAZUS y puntos de control (D_y, A_y) y (D_u, A_u), (FEMA, 2015).	53
Figura 3.10. Representación bilineal de la curva de capacidad (Medina & Music, 2018).	54
Figura 3.11. Curvas de capacidad bilineales para viviendas de mampostería de baja altura (RM2/L) y mediana altura (RM2/M). (a) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) Nivel de diseño sísmico alto.	54
Figura 3.12. Distribuciones EDP vs IML, para viviendas de mampostería de baja altura RM2/L (1 a 3 Pisos). (a) y (d) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) y (e) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) y (f) Nivel de diseño sísmico alto.	55
Figura 3.13. Distribuciones EDP vs IML, para viviendas de mampostería de mediana altura RM2/M (4 a 7 Pisos). (a) y (d) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) y (e) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) y (f) Nivel de diseño sísmico alto.	56
Figura 3.14. Modelo de criterios daños (Villar-Vega et al., 2017).	57
Figura 3.15. Funciones de fragilidad para estructuras de mampostería de baja altura (RM2/L) con la aceleración máxima del suelo (PGA) y SA ($T=0.3$ s). (a) y (d) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) y (e) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) y (f) Nivel de diseño sísmico alto.	58
Figura 3.16. Funciones de fragilidad para estructuras de mampostería de mediana altura (RM2/M) con aceleraciones espectrales de SA ($T=0.5$ s) y SA ($T=0.6$ s). (a) y (d) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) y (e) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) y (f) Nivel de diseño sísmico alto.	59
Figura 3.17. Funciones de vulnerabilidad para estructuras de mampostería de baja altura (RM2/L) con la aceleración máxima del suelo PGA y SA ($T=0.3$ s). (a) y (d) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) y (e) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) y (f) Nivel de diseño sísmico alto.	61
Figura 3.18. Funciones de vulnerabilidad para estructuras de mampostería de mediana altura (RM2/M) con aceleraciones espectrales de SA ($T=0.5$ s) y SA ($T=0.6$ s). (a) y (d) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) y (e) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) y (f) Nivel de diseño sísmico alto.	62
Figura 4.1 Comparación de funciones de vulnerabilidad para estructuras de mampostería en la región de Baja California, a) Viviendas de 1 piso con la aceleración máxima del suelo (PGA), b) Viviendas de 2 pisos con la aceleración espectral (SA= 0.3 s) y c) Viviendas de 3-5 pisos con la aceleración espectral (SA= 0.6 s).....	65
Figura 4.2 Comparación de funciones de vulnerabilidad para estructuras de mampostería reforzada, a) Viviendas de 1 piso con la aceleración máxima del suelo (PGA), b) Viviendas de 2 pisos con la aceleración espectral (SA= 0.3 s) y c) Viviendas de 3-5 pisos con la aceleración espectral (SA= 0.6 s).	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Resumen de procedimientos empíricos de estructuras de mampostería (D'Ayala, 2013).	15
Tabla 1. 2. Resumen de procedimientos analíticos para la evaluación de vulnerabilidad sísmica de estructuras mampostería, adaptado de (D'Ayala, 2013).	18
Tabla 1.3. Resumen de métodos de análisis de historial de tiempo no lineal en osciladores de un grado de libertad del programa RMTK.	20
Tabla 2.1. Viviendas particulares habitadas en Tijuana y su distribución porcentual según el tipo de materiales en (a) paredes y (b) techos (INEGI, 2017).	26
Tabla 2.2. Viviendas particulares habitadas en Tijuana y su distribución porcentual según clase de vivienda (INEGI, 2017).	27
Tabla 2.3. Clasificación de construcción en viviendas de mampostería en la ciudad de Tijuana.	32
Tabla 3.1. Fallas o segmentos de fallas utilizadas en el análisis de peligro sísmico y alguna de sus características (Arce, 2016).	42
Tabla 3. 2. Valores del promedio de la velocidad de cortante, en los primeros 30 m del subsuelo (V_{s30}), en los sitios de interés en la ciudad de Tijuana (Acosta et al., 2009).	43
Tabla 3.3. Valores del desagregado de peligro sísmico para cada sitio de interés.	46
Tabla 3.4. Registros CESDM considerados en la estación PCI para perfil de suelo tipo D de ambientes tectónicos similares.	48
Tabla 3.5. Registros CESDM considerados en la estación CCC para perfil de suelo tipo D de ambientes tectónicos similares.	49
Tabla 3.6. Registros CESDM considerados en la estación PLA para perfil de suelo tipo D y E de ambientes tectónicos similares.	49
Tabla 3.7. Registros CESDM considerados en la estación COL para perfil de suelo tipo C y D de ambientes tectónicos similares.	49
Tabla 3.8. Registros CESDM considerados en la estación TUN para perfil de suelo tipo C de ambientes tectónicos similares.	50
Tabla 3.9. Registros CESDM considerados en la estación PR para perfil de suelo tipo B y C de ambientes tectónicos similares.	50
Tabla 3.10. Registros RANM considerados en ambientes tectónicos similares.	50
Tabla 3.11. Comparación de clasificación de viviendas de mampostería de la ciudad de Tijuana y Manual de HAZUS.	52
Tabla 3.12. Probabilidad de daño en viviendas de baja y mediana altura en diferentes niveles de diseño sísmico.	59
Tabla 3.13. Modelo de daño a pérdida utilizado para derivar funciones de vulnerabilidad.	60
Tabla 3.14. Índice de pérdida en viviendas de baja y mediana altura en diferentes niveles de diseño sísmico.	62
Tabla 4.1 Estudios de vulnerabilidad sísmica de Tijuana de los últimos 20 años.	63
Tabla 4.2 Comparación de resultados a nivel regional en viviendas de 1,2 y 3-5 pisos.	65

Tabla 4.3 Comparación de resultados a nivel internacional en viviendas de 1,2 y 3-5 pisos	68
---	----

CAPÍTULO 1

1.INTRODUCCIÓN

1.1. Impacto de desastres naturales

Entre 2000 y 2019, en todo el mundo se registró un promedio de 4 billones de personas se vio afectadas por los desastres naturales cada año de acuerdo a la base de datos *Emergency Events Database (EM-DAT)* del *The Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)*. Durante este periodo, se registran 7 348 desastres, un total de 1.23 millones de vidas, un promedio de casi 60 000 muertes por año (CRED, 2020).

Los desastres naturales ocurridos en todos los continentes del mundo en el periodo de 2000-2019. Asia se llevó la peor parte de ellos en término de frecuencia y el número de personas afectadas y muertas. Esto se debe principalmente a la gran extensión territorial, además de altas densidades de población en las regiones propensas a los desastres.

En términos de países, los EE.UU. y China reportaron el mayor número de desastres naturales durante este periodo. Una vez más esto se puede atribuir a sus grandes y heterogéneas masas de tierra y las regiones densamente pobladas.

México es el octavo país más afectado por desastres relacionados con el clima (Hidrológico, meteorológico y climatológico) y geofísicos (Terremotos, Movimientos de tierra, volcanes) con aproximadamente 120 eventos reportados (Figura 1.1).

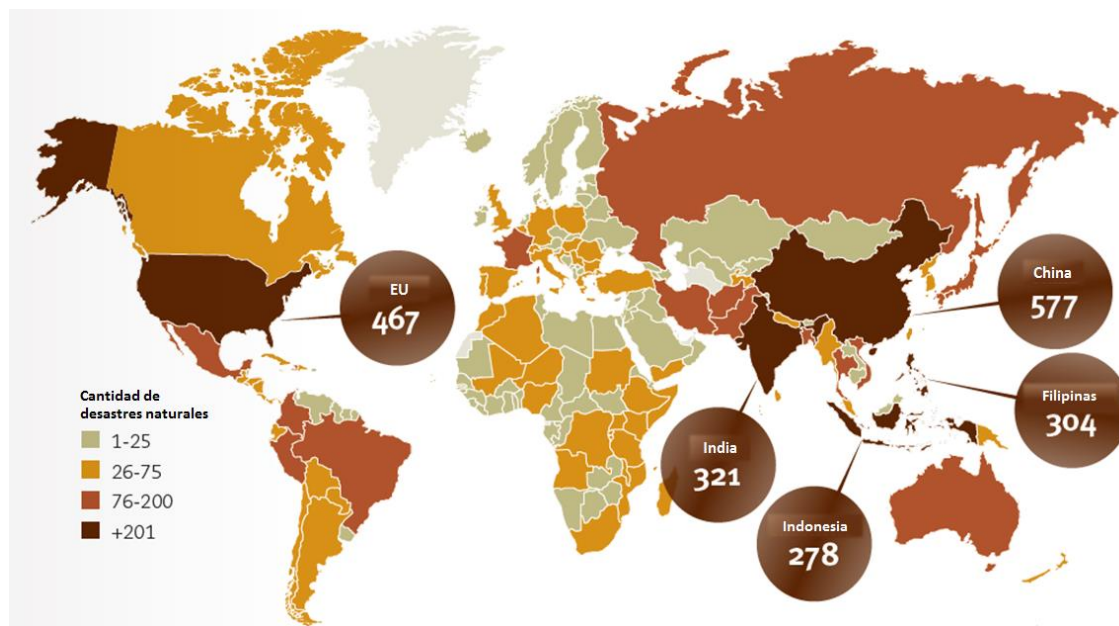


Figura 1.1. Número de desastres reportados por país durante el periodo de 2000-2019 (CRED, 2020).

El impacto de los desastres naturales en los seres humanos depende de múltiples factores entrelazados, incluyendo el tipo de peligro, su ubicación y la duración, el tamaño y la vulnerabilidad de la población en situaciones de peligro. CRED utiliza los números absolutos y relativos de las personas afectadas y muertas en la fase de emergencia de un desastre, así como los costos económicos, para medir la gravedad de los impactos. Los impactos humanos de los diferentes tipos de desastres. Las inundaciones han impactado en más personas que cualquier otro tipo de desastres, que representa el 41% de la población total afectada, cerca de 1.65 billones de personas (Figura 1.2).

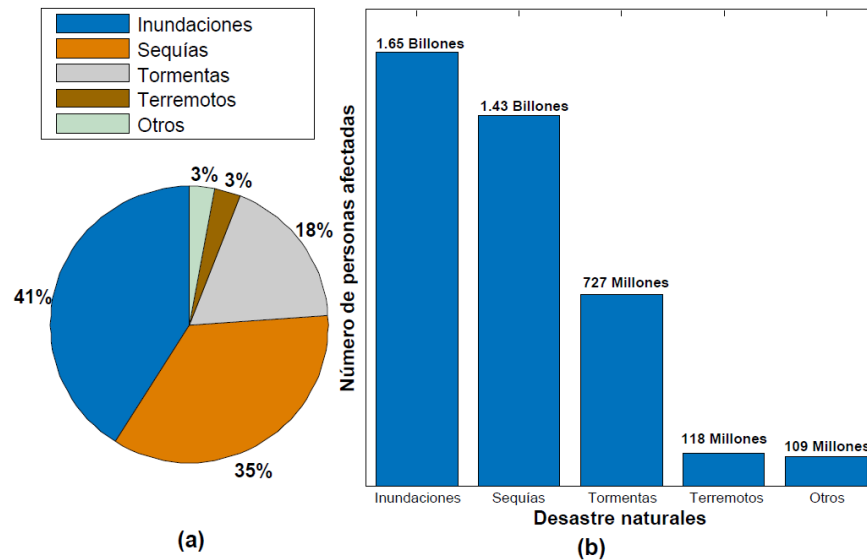


Figura 1.2. (a) Porcentaje de personas afectadas, (b) Número de personas afectadas por diferentes tipos de desastres (Otros: temperaturas extremas, actividad volcánica, deslizamientos e incendios), durante el periodo de 2000-2019 (CRED, 2020).

Los terremotos son típicamente mucho más mortales que cualquier otro tipo de desastre, que representa el 58% de las muertes durante el periodo de 20 años, con una pérdida aproximada de 721 318 vidas (Figura 1.3) y las pérdidas económicas totales de aproximadamente más de 787 billones de dólares (Wallemacq & Below, 2018).

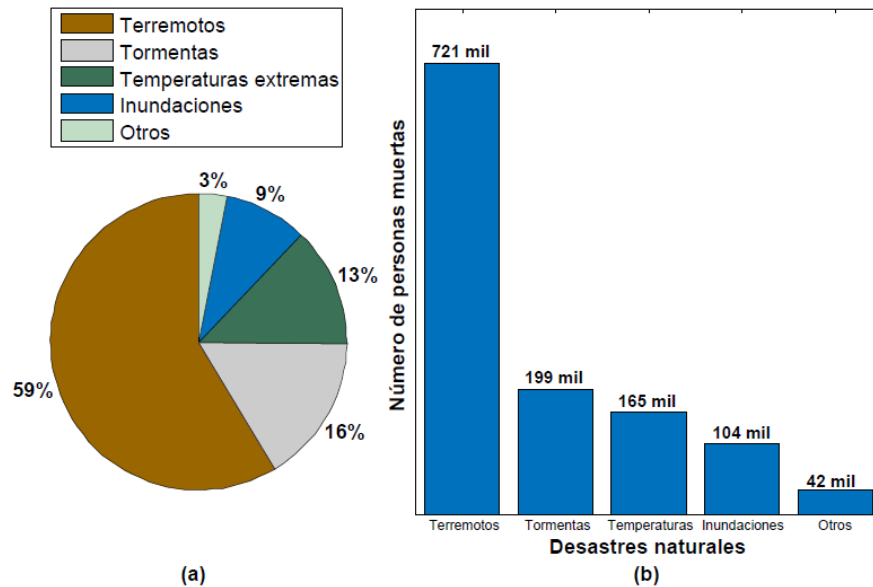


Figura 1.3. (a) Porcentaje de personas muertas, (b) Número de decesos por diferentes tipos de desastres (Otros: sequías, deslizamientos, actividad volcánica y movimientos de masas), durante el periodo de 2000-2019 (CRED, 2020).

1.2. Regionalización sísmica en México

México está dividido en cuatro zonas sísmicas (A, B, C y D), para las cuales existen tres tipos de perfiles de suelo diferentes: I (suelos firmes), II (suelos de transición) y III (suelos blandos). El criterio de regionalización se fundamenta en los valores de la aceleración en roca, a_0^r . Como se puede observar en la Figura 1.4, todo el territorio de Baja California está clasificado dentro de las zonas C y D (intensidad sísmica alta y muy alta) en el Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE (MDOC-15, 2015).

Por sus características geológicas, México está catalogado como un país con zonas altamente sísmicas, con miles de temblores al año. La mayoría no son perceptibles, pero algunos son devastadores. Por otra parte, la superposición de sismos y la interacción entre los factores de riesgo como la pobreza, el crecimiento demográfico en zonas expuestas al peligro y urbanización descontrolada, colocan a estas zonas en mayor riesgo (UN-CRED, 2020). En la Figura 1.5 se muestran algunos terremotos en el periodo de 1980-2017, dejando como resultado millones de afectados, miles de viviendas destruidas y más de 20 000 muertes (L. Silva, 2019).

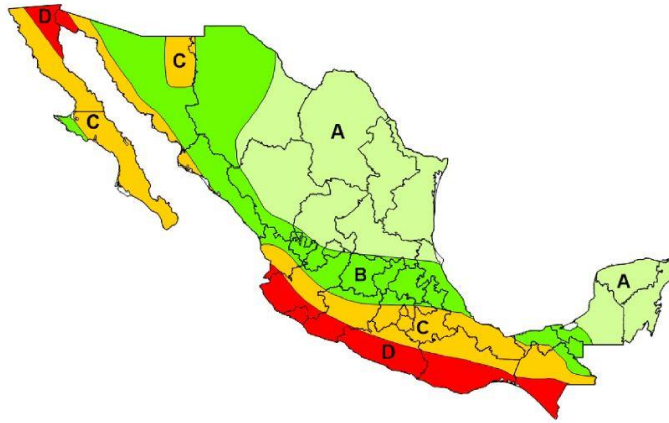


Figura 1.4. Regionalización Sísmica de la República Mexicana. La zona A (Intensidad sísmica baja): $PGA=a_0^r < 50\text{cm/s}^2$. La zona B (Intensidad sísmica moderada): $PGA=50 \leq a_0^r < 100\text{cm/s}^2$. La zona C (Intensidad sísmica alta): $PGA=100 < a_0^r < 200\text{cm/s}^2$. La zona D (Intensidad sísmica muy alta): $PGA=a_0^r \geq 200\text{cm/s}^2$ (Godínez-Domínguez et al., 2021).

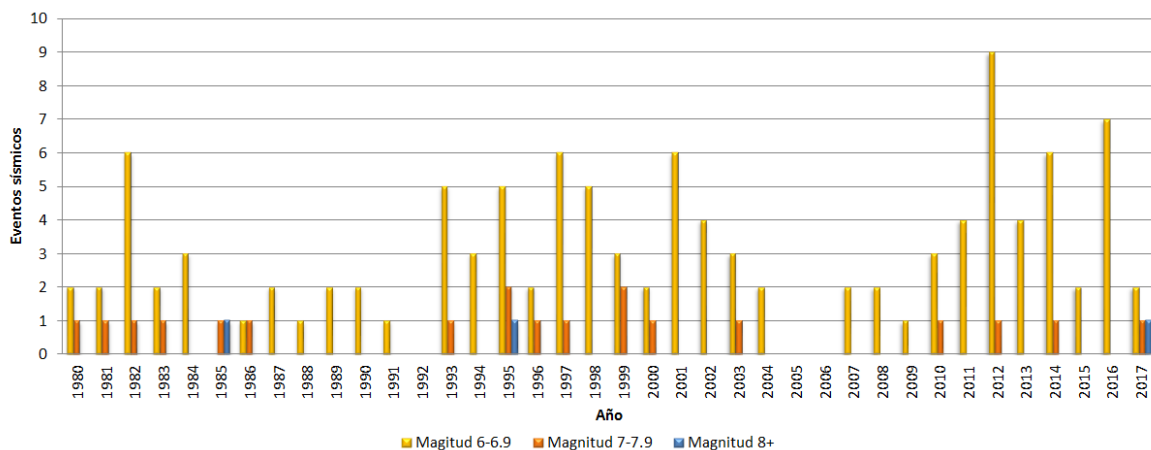


Figura 1.5. Registros sísmicos en México 1980-2017 de magnitudes igual y mayores a 6.

1.3. Antecedentes

El estado de Baja California (BC) se ubica tectónicamente en una zona activa. La región está sujeta a un elevado peligro sísmico debido a su cercanía a las zonas sismogénicas asociadas a la interacción de las placas del Pacífico y Norteamericana (Arce, 2016).

Baja California es el onceavo estado más poblado de México, se encuentra al noroeste del país, como se puede observar en la Figura 1.6, se divide en seis municipios. La zona más poblada es Tijuana, donde se concentra más del 50% de la población estatal, siendo la ciudad más poblada a nivel nacional con un total de

1 922 523 habitantes y 576 708 viviendas (representa el 50.2% del total estatal), en un área de 1 074.1 km² (INEGI, 2021).

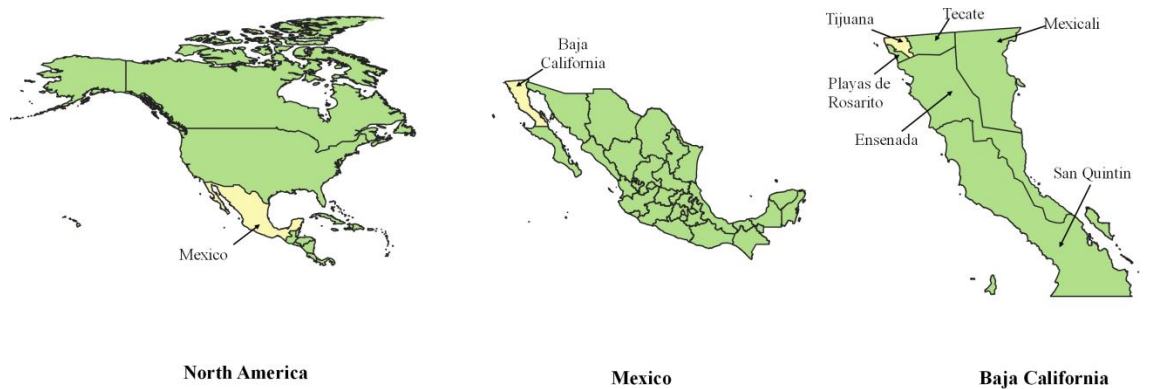


Figura 1.6. Organización geográfica de la región de interés.

El marco sismotectónico que afecta el noroeste de Baja California está conformada por los siguientes sistemas de fallas: Agua Blanca, sistema San Miguel-Vallecitos, Ojos Negros, Tres Hermanos, Sierra Juárez, San Pedro Mártir (Soares, 2003), Calabazas, Maximinos, Pescaderos y Bahía Soledad, sistema *Rose Canyon-Newport*, *Coronado Bank*, San Diego, San Clemente y *Elsinore* (Arce, 2016).

Dentro de los antecedentes de sismicidad en la región, destaca un sismo reciente el Mayor-Cucapah ocurrido en la región del valle de Mexicali el 4 de abril de 2010, con magnitud 7.2, también en la región central del norte de Baja California destacan el sismo de Guadalupe de 1944 ($M=5.7$), los sismos de San Miguel de 1956 ($M=6.8$, 6.4 y 6.3), localizados en el sistema San Miguel- Vallecitos, así como el sismo de 1934 ($M=5.9$) asociado a la falla San Clemente, en el borde continental. Estos antecedentes sísmicos indican que no se debe descartar un sismo de magnitud importante en las cercanías de la franja costera del Pacífico del norte de Baja California (Arce, 2016).

La Figura 1.7 presenta la distribución de los eventos sísmicos históricos de (1800-2021) e instrumentales de magnitud mayor a 4.0 (M_w) en el sur de California, Tijuana y sus alrededores en México, así como la actividad de fallas cercanas a la zona de interés. Los eventos instrumentales e históricos fueron extraídos del Servicio Sismológico Nacional (SSN) y del *United State Geological Survey* (USGS).

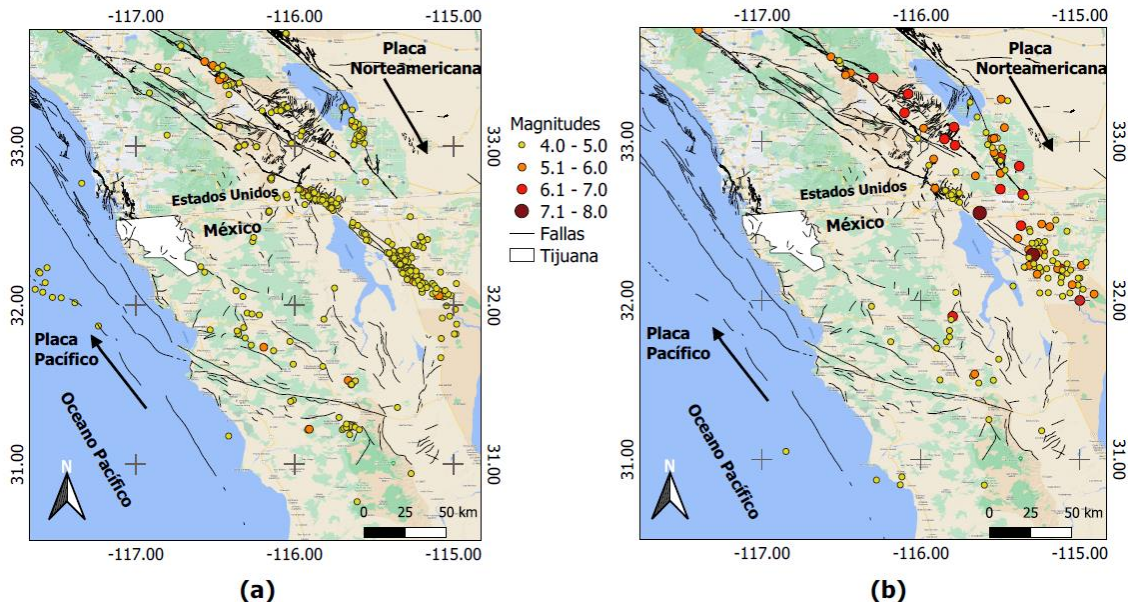


Figura 1.7. Eventos sísmicos y fallas del sur de California y noroeste de México. (a) Eventos instrumentales. (b) Eventos históricos (Díaz et al., 2023a).

A la probabilidad de ocurrencia de sismos, asociado a daños causados a las estructuras, población afectada y damnificada se le conoce como riesgo sísmico (Boissonnade & Shah, 1984). El concepto de convolución en ocasiones se utiliza para modelar el riesgo de cada elemento expuesto y se dice que el riesgo es la convolución de tres funciones temporales: la exposición, la peligrosidad y la vulnerabilidad (Boissonnade & Shah, 1984) (Figura 1.8).

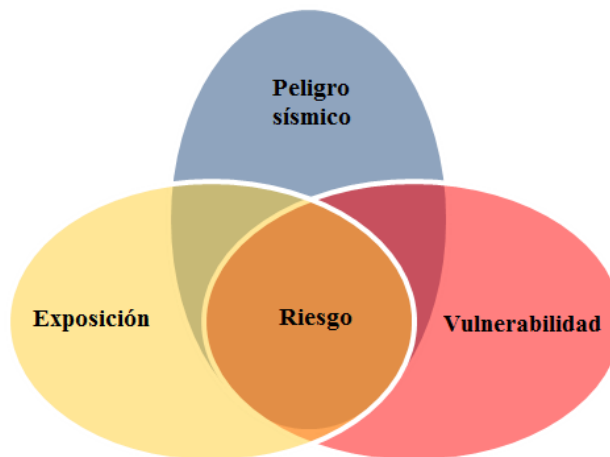


Figura 1.8. Estimación del riesgo sísmico, Adaptada de (Boissonnade & Shah, 1984).

La ecuación (1.1) es conceptualmente potente y sencilla y toma del análisis de sistemas lineales el concepto de convolución. Con todo, su aplicación no es sencilla dado que la definición de las tres funciones involucradas es compleja.

$$R(e, x, t) = E(e, x, t) \times P(e, x, t) \times V(e, x, t) \quad (1.1)$$

donde $R(e, x, t)$ define el riesgo del elemento e , expuesto en el lugar x en el instante t ; $E(e, x, t)$ es la función de costo o valor económico del elemento expuesto $P(e, x, t)$ es la función que define la peligrosidad sísmica que es independiente del elemento y $V(e, x, t)$ es la función que define la vulnerabilidad del elemento expuesto e (Lantada, 2007).

La evaluación de riesgos es una metodología que busca determinar el nivel de riesgo a través de un análisis, ya sea determinista o probabilístico, de los peligros sísmicos y la vulnerabilidad de estructuras y personas. En lo que respecta a la evaluación de vulnerabilidad de estructuras, estos estudios son poco comunes en la región de Baja California, y los pocos documentados se resumen a continuación:

El proyecto llamado *Risk Assessment Tools for DIagnosis of Urban areas against Seismic disasters* (RADIUS) elaborado por Rosquillas y Mendoza (Rosquillas et al., 2000), donde los objetivos principales del proyecto son el producir herramientas para estimar la evaluación y mitigación del riesgo sísmico de la ciudad de Tijuana, crearon un escenario de daños utilizando matrices de daño calibradas para Quito, Ecuador, a partir de la evaluación de los resultados se creó un plan de acción coordinado por las autoridades.

Mapas de microzonación de la respuesta sísmica de los suelos en la zona urbana de Ensenada elaborado por Soares (Soares, 2003), mediante la aplicación de ecuaciones empíricas predictivas adecuadas para la provincia tectónica; se catalogaron las estructuras críticas y estratégicas más importantes de la ciudad y se estimaron los daños esperados sobre esas estructuras mediante la aplicación de matrices de vulnerabilidad. Los resultados que obtuvo tienen el carácter de escenario sísmico restringido, ya que se limita al análisis de un número reducido de estructuras importantes de Ensenada; quedando como antecedente para que las estimaciones de daños sirvan como guías para la planeación de estudios detallados, por ingenieros civiles, de la capacidad real de respuesta sísmica de las estructuras que lo requieran.

Utilizando técnicas geoespaciales en ambiente de Sistemas de Información Geográfica Garatchia, Baro y Huerta (Garatchia et al., 2016) realizaron una evaluación de riesgo sísmico en la ciudad de Tijuana. Hicieron una caracterización geológica y geotécnica, identificaron la región de respuesta máxima en la ciudad (vulnerabilidad estructural) propuesta por Bazan y Meli (Bazán et al., 2002), estimaron la vulnerabilidad socioeconómica e identificaron las estructuras críticas (Exposición); propusieron los siguientes rangos de vulnerabilidad estructural: bajo, medio y alto, el rango alto contiene los periodos de vibración de 0.7 a 1.2 segundos. Estos valores los encontraron principalmente en las delegaciones Centro, Centenario, Cerro Colorado, La Mesa, Mesa de Otay y parte de Playas de Tijuana.

En función de las pérdidas físicas a las edificaciones de las ciudades de Tijuana y Mexicali, González obtuvo el impacto socioeconómico, su estudio lo realizó en viviendas de uno y dos pisos, se enfocó en la afectación a las personas que las habita, en términos de daños a la estructura o muerte de las personas, a consecuencia de la manifestación de sismos.

Por medio de la plataforma *Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment* CAPRA (Cardona et al., 2012) realizó el cálculo del impacto socioeconómico mediante un análisis probabilístico del riesgo, la cual requirió la integración del peligro sísmico, así como también, de un inventario de los elementos expuestos, particularmente de las viviendas (González, 2016).

Mediante la herramienta *OpenQuake Engine*, Romero realizó un escenario de riesgo sísmico en la ciudad de Tijuana, considerando edificaciones de tipo habitacional, industrial y comercial. El peligro sísmico utilizado fue el desarrollado *Earthquake Engineering Research Institute* (EERI) del “Escenario de planificación del terremoto de San Diego, Magnitud de 6.9 (Mw) en la falla *Rose Canyon*”. El inventario de elementos expuestos se basa en la encuesta intercensal Nacional de 2015 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Las funciones de vulnerabilidad para los sistemas constructivos predominantes de la región que son mampostería, acero, concreto y madera, fueron tomadas de la fundación *Global Earthquake Model* (GEM) de Latinoamérica (Romero, 2020).

1.4. Justificación

Baja California es uno de los estados con más riesgo por sismos, con pérdidas promedio anuales por más de 400 millones de dólares (Figura 1.9). La ciudad de Tijuana, perteneciente a este estado, es la de mayor número de habitantes y viviendas de todo el país, se encuentra en una zona de intensidad sísmica alta, con la posibilidad de ocurrencia de un sismo con una intensidad de potencial destructivo, el riesgo sísmico es inminente y actualmente no existen los parámetros para determinar las pérdidas económicas y humanas resultantes de estos posibles sismos.

En este estudio se obtuvieron las funciones de vulnerabilidad para viviendas 1 a 5 pisos de mampostería reforzada, con la finalidad de determinar la probabilidad de daño y pérdida debido a sismos en este tipo de estructuras en la ciudad de Tijuana. Estas funciones son necesarias para ubicar la distribución geográfica de mayor riesgo sísmico en la ciudad, también para determinar el nivel de daño en viviendas después de un sismo, así como las pérdidas económicas y humanas.

En el caso de los profesionales de la construcción partiendo de los resultados obtenidos podrán definir nuevas regulaciones en reglamentos y normativas del estado para respaldar prácticas de construcción a prueba de sismos, siendo el beneficiario principal el usuario de la vivienda. Para las autoridades de prevención de desastres les beneficiara para el desarrollo de acciones de modernización y fortalecimiento en la planificación de planes de emergencia urbanos o regionales antes y después de un sismo.

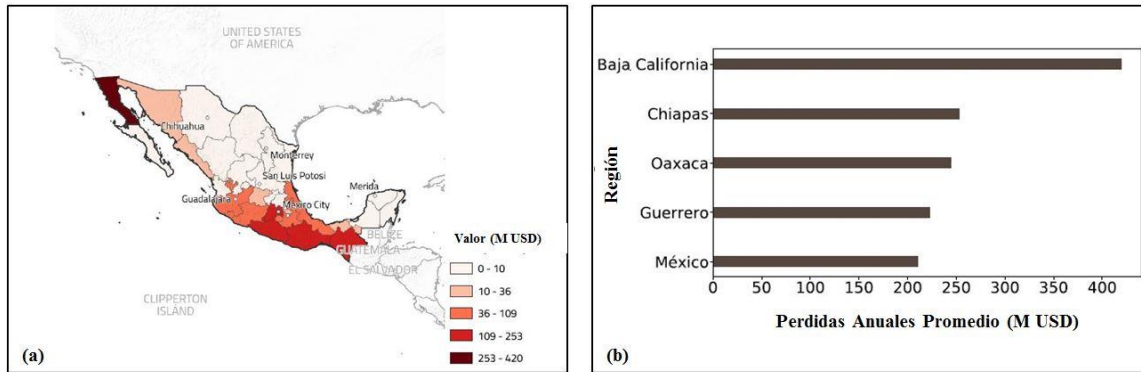


Figura 1.9. Indicadores de Riesgo en México, (a) Pérdidas anuales promedio, (b) Regiones de mayor riesgo sísmico (OpenQuake, 2019).

1.5. Planteamiento del problema

Para estimar las pérdidas estructurales debido a sismos con menos incertidumbre, en la ciudad de Tijuana, Baja California, es importante obtener las funciones de vulnerabilidad características de las viviendas, al ser la infraestructura que mayormente predomina.

Al no existir funciones de vulnerabilidad características de la zona, en estudios de los últimos 20 años (González, 2016; Romero, 2020; Rosquillas & Mendoza, 2000) han evaluado el riesgo con mayor incertidumbre en las zonas de estudio, al utilizar funciones de vulnerabilidad de Centro América y América del Sur, donde la similitud de los sistemas constructivos en ambas zonas lo justifica.

En esta investigación se determina el comportamiento dinámico de las viviendas en la ciudad de Tijuana, en términos de desplazamientos generados, cortantes máximos, estados de daño, valores de distorsión. Se calcularán las funciones de vulnerabilidad propias de la región utilizando la herramienta de modelado de vulnerabilidad de GEM, *Vulnerability Modeller's Toolkit* (VMTK) (Martins et al., 2021), para tener menos incertidumbre en la estimación de pérdidas debido a sismos.

1.6. Objetivos

Calcular las funciones de vulnerabilidad sísmica, en edificaciones habitacionales existentes en el noroeste de Baja California, mediante un análisis probabilista, para obtener las pérdidas debido a sismos, la cual para llevarse a cabo requiere de:

1. Determinar los indicadores socioeconómicos, haciendo un inventario físico para conocer los elementos expuestos en la zona de estudio.
2. Definir el peligro sísmico, mediante el software EPPS14, para seleccionar un conjunto de registros de movimiento de tierra representativos del ambiente tectónico y la sismicidad de la zona de estudio.
3. Caracterizar las estructuras en estudio obteniendo curvas de capacidad y funciones de fragilidad para cada estado de daño, mediante la herramienta VMTK.

4. Estimar las pérdidas estructurales debido a sismos representativos de la zona de estudio, con las funciones de vulnerabilidad.

1.7. Hipótesis

Las pérdidas debido a sismos se logra, si y solo si, se calculan las funciones de vulnerabilidad adecuadas a los sistemas estructurales y constructivos existentes en la localidad de Tijuana.

1.8. Marco teórico

1.8.1 Exposición

Los elementos expuestos (Exposición) son una componente importante para la evaluación del riesgo y se define como la ubicación, los atributos y valores de los activos que son importantes para las comunidades (materiales de construcción, número de habitantes y costo de la edificación) al verse afectados por un sismo (Figura 1.10) (Boissonnade & Shah, 1984; Crowley, 2014).

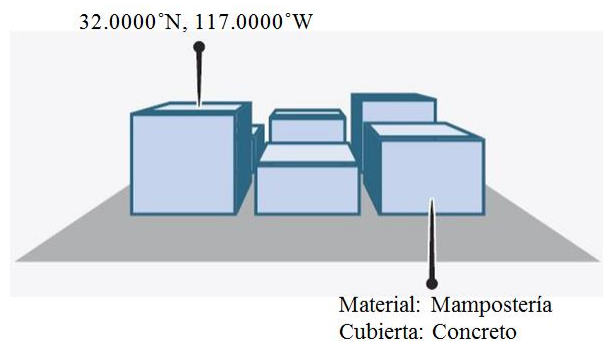


Figura 1.10. Localización y características de estructuras (Crowley, 2014).

1.8.2 Peligro sísmico

El peligro sísmico se define como la probabilidad/posibilidad de que en un sitio se produzcan movimientos sísmicos con intensidades por arriba de un cierto umbral (potencialmente destructivo) y en un determinado periodo de tiempo (Arce, 2016; Crowley, 2014). Las consecuencias negativas derivadas de estos probables movimientos se consideran como parte del riesgo para la sociedad. La vulnerabilidad de la sociedad, por lo tanto, se refiere a lo susceptible que ésta resulta a tales efectos dañinos; éste parámetro es inverso a la capacidad que tiene la sociedad de resistir tales efectos adversos (Arce, 2016) .

En consecuencia, para evaluar el riesgo sísmico en una región resulta indispensable hacer primeramente una estimación del peligro sísmico (Arce, 2016). El principal objetivo de esta componente es determinar el desagregado de peligro sísmico de los sitios de interés de la ciudad de Tijuana, Baja California, para seleccionar un conjunto de registros de movimiento de tierra representativos del ambiente tectónico y la sismicidad de la zona de estudio.

Para unificar criterios, la *United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization* (UNESCO), en conjunto con la *United Nations Disaster Relief Organization* (UNDRO), propusieron la siguiente definición de peligro sísmico:

$$H = P[Y(x) \geq y^*; t] \quad (1.2)$$

El peligro (H) queda definido, entonces, como la probabilidad de que el parámetro característico del movimiento del suelo (Y , que puede ser, aceleración pico, velocidad pico, aceleración espectral, entre otros) en la ubicación (x), se iguale o exceda algún valor (y^*) de un parámetro del movimiento del suelo en un periodo de tiempo dado (t ; en años)(Morales-Esteban et al., 2012). La evaluación cuantitativa del peligro de temblores del suelo debido a futuros terremotos en un sitio en particular requiere el desarrollo de un modelo de sismicidad que especifique la distribución espacial de todas las fuentes sísmicas, por medio de líneas o zonas en las ubicaciones de fallas geológicas activas, y su tamaño potencial. Evidentemente, existen incertidumbres relacionadas con el tamaño de un terremoto y la ocurrencia temporal y espacial de futuros terremotos. Dependiendo de cómo se contabilicen estas incertidumbres, los análisis de peligro sísmico se pueden clasificar en dos categorías principales: análisis determinista de peligro sísmico (DSHA) y análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA). Vale la pena señalar que en lugar de verlos como dos tipos diferentes de análisis, DSHA es de hecho un caso especial de PSHA donde un solo escenario de terremoto, normalmente el peor escenario, se considera para la definición del peligro sísmico en un sitio (Bhattacharya et al., 2019).

Análisis determinístico de peligro sísmico (DSHA)

El análisis de riesgo sísmico determinista es uno de los enfoques sencillos y directos para evaluar el riesgo sísmico mediante el uso de modelos discretos de un solo valor. Este método se basa en la causa del terremoto más que en su efecto. Por ejemplo, la magnitud del terremoto de diseño se puede predecir con cierta aproximación a partir de la longitud de las fallas y su proximidad al sitio. Por supuesto, se asume que una cierta parte de la falla se va a romper y se lleva a cabo utilizando algunas relaciones empíricas establecidas que se basan en datos obtenidos de terremotos anteriores.

Una DSHA típica se puede realizar en cuatro pasos (Figura 1.11).

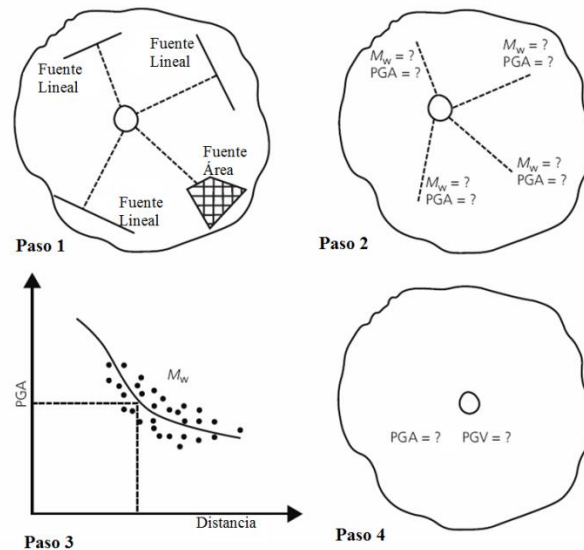


Figura 1.11. Pasos involucrados en DSHA. Paso 1. Se identifican las fallas en las cercanías del sitio que pueden causar terremotos. Paso 2. Se predice la magnitud máxima de los terremotos de cada una de estas fuentes. Paso 3. Seleccione el terremoto de control para el sitio, es decir, qué terremoto tiene el efecto más severo (generalmente PGA) en el sitio. Paso 4. Especifique el PGA, PGV u otra medida que describa el efecto del terremoto para el sitio en consideración.(Bhattacharya et al., 2019).

Este método se utiliza en el diseño de plantas nucleares, presas o estructuras para las cuales un evento sísmico importante podría provocar consecuencias catastróficas. Su uso se debe a que plantea la situación más desfavorable posible en el sitio de manera rápida y sencilla. El método determinista tiene algunas desventajas. No proporciona información de la probabilidad de la ocurrencia del sismo de control (el sismo de cierta magnitud y a cierta distancia que produce el peor escenario posible), ya que no toma en cuenta la ley de recurrencia sísmica. Además, no toma en cuenta al resto de los sismos, aquellos con magnitudes menores a la máxima esperada y que ocurran en sitios distintos a la distancia más corta. Tampoco provee la probabilidad de que el sismo ocurra en el lugar establecido, ni la probabilidad de que cierto valor del parámetro sea excedido. El método involucra decisiones subjetivas, sobre todo en la determinación del potencial sísmico, al suponer la magnitud máxima posible en las fuentes sísmicas generadoras de peligro(Arce, 2016).

Análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA)

Posteriormente, Cornell definió los métodos probabilísticos (Cornell, 1968). Los métodos probabilísticos resumen la contribución de todos los posibles terremotos que pueden afectar una ubicación y consideran las leyes de recurrencia para ellos. Como resultado, se estima la probabilidad de exceder todos los valores de un parámetro del movimiento del suelo esperado en la ubicación, durante un período de tiempo. El peligro está representado por curvas de probabilidad. El desarrollo de los modelos de predicción del movimiento fuerte del suelo permitió la construcción de espectros de diseño, donde se considera la probabilidad de exceder todas las ordenadas del espectro (y no solo la aceleración máxima). Los espectros de peligro uniformes representan los valores predichos para un período de retorno de todas las ordenadas espectrales (Morales-Esteban et al., 2012).

El análisis probabilístico de peligro sísmico permite cuantificar las incertidumbres de tamaño y distribuciones espaciales y temporales de futuros terremotos, y permite cuantificar estas incertidumbres de manera racional mediante distribuciones de probabilidad (Bhattacharya et al., 2019).

Una PSHA típica se puede realizar en cuatro pasos (Figura 1.12)

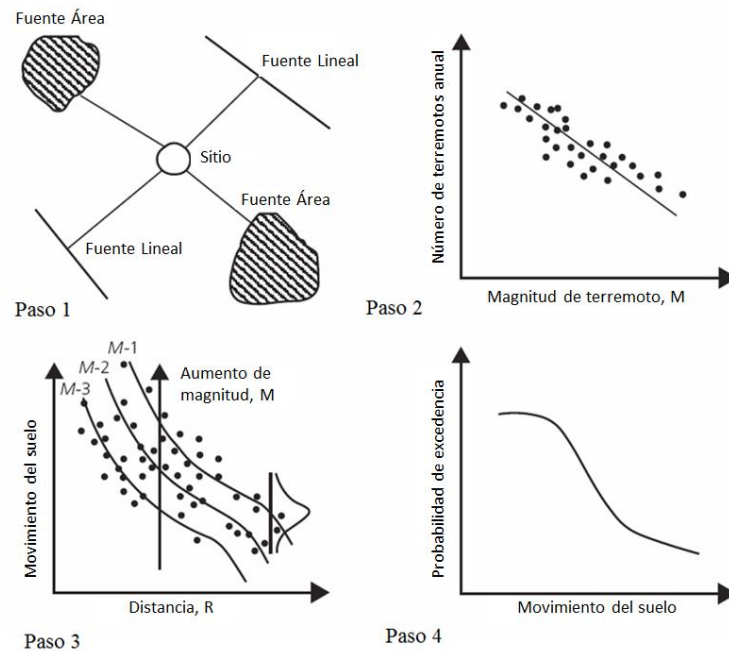


Figura 1.12. Pasos involucrados en PSHA. Paso 1. Identificar la fuente de posibles terremotos y representar gráficamente. Paso 2. Evaluar la sismicidad de las fuentes de terremotos a partir de la relación de recurrencia. Paso 3. Desarrollar los modelos de atenuación del movimiento del suelo. Paso 4. Mediante la integración de modelos, genere las curvas de peligro sísmico que expresen la probabilidad de exceder varios niveles de movimiento del suelo dentro de un período de tiempo.(Bhattacharya et al., 2019).

1.8.3 Vulnerabilidad sísmica

La evaluación de la fragilidad y vulnerabilidad sísmica es necesaria para la evaluación del riesgo sísmico probabilístico. Idealmente, los modelos desarrollados y calibrados para el inventario de edificios de interés estarían fácilmente disponibles (Díaz et al., 2023b). Sin embargo, la falta de datos sobre daños y los estudios analíticos insuficientes conducen a una escasez de modelos de fragilidad y vulnerabilidad (Martins & Silva, 2020).

Uno de los componentes principales de la mayoría de las metodologías de evaluación de riesgos, es la relación entre el parámetro de intensidad del peligro y el nivel de daño o pérdida para una tipología de edificio determinada (V. Silva et al., 2014; Yamin et al., 2017). Generalmente se emplean dos enfoques diferentes, uno de ellos es con funciones de fragilidad y otro con el de funciones de vulnerabilidad (Figura 1.13) (Díaz et al., 2023b).

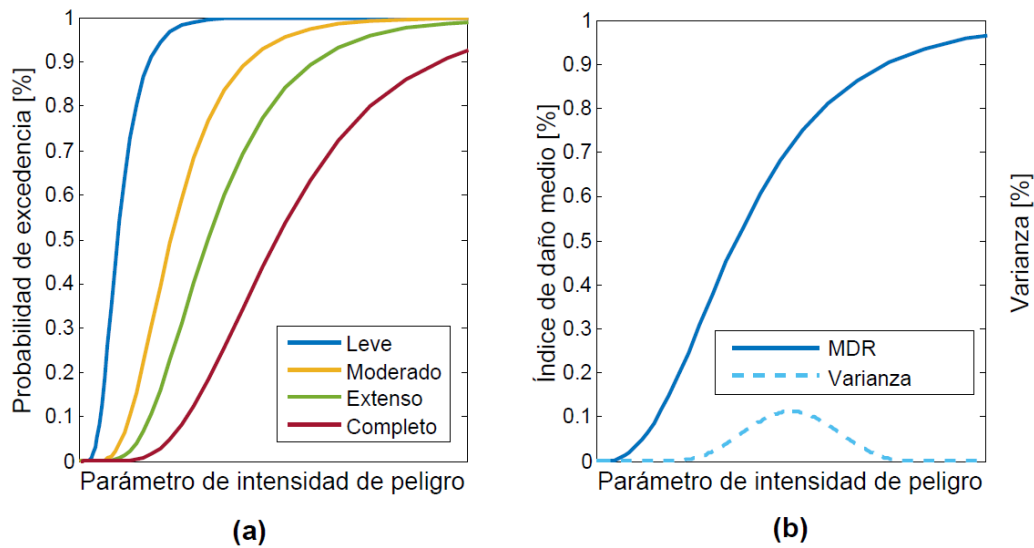


Figura 1.13. Representación típica de formulaciones de (a) fragilidad y (b) vulnerabilidad, adaptado de (Yamin et al., 2017).

Las funciones de fragilidad expresan la probabilidad de exceder un estado de daño, para un valor predeterminado de la medición de intensidad (IM) generalmente representado por el PGA o los desplazamientos espectrales (Chieffo et al., 2019). Los estados de daño suelen definirse en términos cualitativos y descriptivos (Park et al., 1987) (ejemplo, S: leve, M: moderado, E: extenso y C: completo). Para realizar las funciones de fragilidad es necesario considerar N estados de daño diferentes, para un sistema estructural. La probabilidad de alcanzar o exceder el i -ésimo estado de daño dada una intensidad de peligro, se suele estimar por medio de una función de distribución de probabilidad logarítmica normal una diferente para cada estado de daño considerado (Díaz et al., 2023b).

En el caso de las funciones de vulnerabilidad proporcionan toda la información para calcular la probabilidad de alcanzar o superar un valor de pérdida, dada la intensidad seleccionada del movimiento del terreno (Borzi et al., 2008). Para obtener las funciones de vulnerabilidad requiere la definición de la pérdida como variable aleatoria. La función de vulnerabilidad representa la variación de los momentos estadísticos de pérdida (media y varianza) para diferentes valores de la intensidad del peligro. La pérdida se define utilizando escalas numéricas en lugar de escalas cualitativas como ocurre en los cálculos de los estados de daño (por ejemplo, la relación entre el costo de reparación y el valor de reposición del elemento, también conocido como el índice de daño medio, (*Mean Damage Ratio*, MDR), lo que permite su uso directo en cálculos probabilísticos de riesgo y pérdida. Por lo general, se supone una función de distribución de probabilidad Beta para el cálculo de pérdidas (Yamin et al., 2017). Es posible obtener la función de vulnerabilidad a partir de la formulación de fragilidad de cualquier componente dado, una vez que se asigna un valor de pérdida esperada a cada estado de daño (V. Silva et al., 2014).

Para el desarrollo de funciones de fragilidad y vulnerabilidad existen los siguientes métodos: empíricos y analíticos (Figura 1.14). Los métodos empíricos son basados en los resultados de las pruebas de laboratorio o

en la información recopilada de los informes de evaluación de daños por sismos (Yamin et al., 2017), pueden tener algunas desventajas, como la subjetividad en la asignación de cada edificio a un estado de daño o la falta de precisión en la determinación del movimiento del terreno que afecta a la región (Kassem et al., 2020). Para superar estas limitaciones, se pueden emplear metodologías analíticas en una sola estructura que se cree que es representativa de una clase de edificios, o en un conjunto de edificios generados aleatoriamente, modelados mediante técnicas de análisis estructural y sujetos a patrones de carga lateral o acelerogramas específicos (V. Silva et al., 2014).

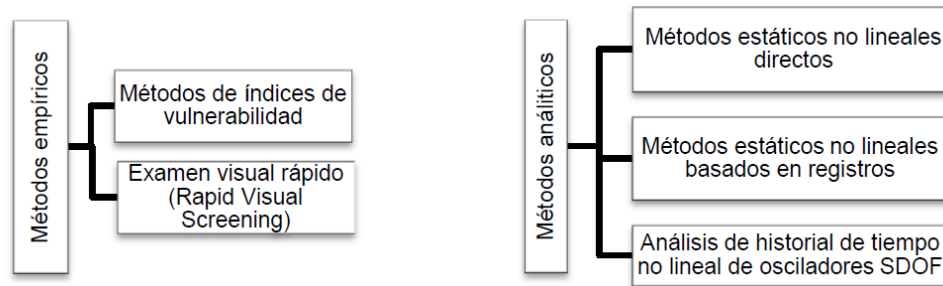


Figura 1.14. Métodos empíricos y analíticos para la evaluación de la vulnerabilidad.

1.8.4. Métodos empíricos para la evaluación de la vulnerabilidad

Métodos empíricos pioneros de los 70's y 80's, también alguno de ellos de los últimos 15 años, utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras de mampostería se presentan a manera de resumen en la tabla 1.1 y se describen a continuación solo algunos de ellos.

Tabla 1.1. Resumen de procedimientos empíricos de estructuras de mampostería (D'Ayala, 2013).

Método	Datos requeridos	Destacado del estudio	Medida de Intensidad	Formulario	Referencia
DPM (<i>Damage probability matrix</i>)	Descripción tipológica	Evaluación de vulnerabilidad	Intensidad macrosísmica	N/A	(Whitman et al., 1974)
VIM (<i>Vulnerability index method</i>)	Descripción tipológica	Funciones de fragilidad y vulnerabilidad	PGA	N/A	(Benedetti et al., 1988; Lagomarsino & Giovinazzi, 2006)
AeDES (<i>Agibilità e Dannonell' Emergenza Sismica</i>)	Descripción tipológica	Estados de daño	Intensidad macrosísmica	Formulario de nivel de daño	(Baggio et al., 2014)
RVS (<i>Rapid Visual Screening</i>)	Descripción tipológica	Estados de daño	Respuesta espectral	Formulario de recolección de datos de FEMA - 154	(FEMA P-155, 2015)

Métodos de índices de vulnerabilidad (Vulnerability index method, VIM)

En el método Italiano (Benedetti et al., 1988), mediante un índice de vulnerabilidad I_v se obtiene la vulnerabilidad de un edificio, que se obtiene a partir de evaluar diferentes parámetros relacionados con componentes, estructurales y no estructurales, que son parte fundamental en el comportamiento sísmico del edificio. El método esencialmente consiste en la evaluación de 11 parámetros a partir de observaciones realizadas en campo. Para estructuras de mampostería no reforzada tienen las siguientes categorías A, B, C y D, son condiciones de favorables a desfavorables respectivamente y su evaluación permite asignar un valor numérico K_i que varía entre 0 y 45. El peso de los parámetros W_i varía de 0.25 a 1.0. El índice de vulnerabilidad I_v , se calcula mediante la ecuación (1.3) que es la suma ponderada de los valores numéricos que expresan la calidad de cada uno de los once parámetros. Cuanto mayor es el índice de vulnerabilidad peor es la capacidad resistente del edificio (Lantada, 2007).

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i W_i \quad (1.3)$$

El método macrosísmico (Lagomarsino & Giovinazzi, 2006), permite la evaluación de la vulnerabilidad de un conjunto de edificios, hasta la evaluación de la vulnerabilidad de un solo edificio. La vulnerabilidad se mide en términos de un índice de vulnerabilidad V y de un índice de ductilidad Q , ambos evaluados teniendo en cuenta la tipología del edificio y sus características constructivas. Este índice varía entre 0 y 1, siendo más cercano a 1 cuanto más vulnerable es el edificio. El peligro se describe en términos de intensidad macrosísmica, según la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 (EMS, 1998), que se considera, en el marco del enfoque macrosísmico, como un parámetro continuo evaluado con respecto a una condición de suelo rígido; Los posibles efectos de amplificación debido a las diferentes condiciones del suelo están dentro del parámetro de vulnerabilidad V . Para daños físicos al edificio, se utilizan los grados de daño EMS-98, describiendo el daño observado para componentes estructurales y no estructurales. Se identifican cinco grados de daño D_k ($k = 0/5$): D1 leve, D2 moderado, D3 pesado, D4 muy pesado, D5 destrucción, más la ausencia de daño D0 sin daño.

Algunos estudios actuales realizados en edificaciones residenciales permitieron estimar los daños por fenómenos sísmicos, como el de Serrano y Temes (Serrano-Lanzarote & Temes-Córdovez, 2015) que presentaron un estudio sobre la vulnerabilidad sísmica en la Comunidad Valenciana, España, para la asignación de vulnerabilidad a cada tipo de edificio, la realizaron en función de la opinión de expertos y contrastaron dicha información mediante la aplicación del método del índice de vulnerabilidad. Pavel et al. (Pavel et al., 2018) utilizaron el método macrosísmico en viviendas de Bucarest, capital de Rumania, compararon la evaluación de daños y pérdidas sísmica utilizando el software *KOERILoss*, con los resultados de un estudio previo basado en el manual *Hazard of United State* (HAZUS). Los resultados de los análisis demostraron que las pérdidas económicas y el grado medio de daños son más pequeños que los obtenidos usando la metodología HAZUS. Sin embargo, el número de personas afectadas en este estudio son superiores.

El método de índice de vulnerabilidad ha sido simplificado para evaluar la vulnerabilidad sísmica en fachadas de edificios de mampostería como lo realizó Ferreira et al. (Ferreira et al., 2017), en los archipiélagos de Azores Portugal; también el VIM ha sido adaptado con un total de catorce parámetros por Vicente et al. (Vicente et al., 2011) y utilizado por Catulo et al. (Catulo et al., 2018) para la evaluación sísmica de edificios de Pombalino, en la ciudad de Lisboa.

Examen visual rápido (Rapid Visual Screening, RVS)

El RVS es un procedimiento de evaluación cualitativa utilizado en la evaluación de vulnerabilidad sísmica de edificios. El procedimiento se puede implementar con relativa rapidez en un gran inventario de edificios para identificar estructuras potencialmente peligrosas sin los altos costos de análisis sísmicos detallados de edificios individuales. El método RVS implica una encuesta de acera que se utiliza para recopilar información sobre los principales parámetros que inciden en la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones (FEMA P-155, 2015).

La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) desarrolló un número de directrices para la evaluación y rehabilitación del riesgo sísmico de edificios. FEMA 310 proporciona un proceso de tres niveles para la evaluación sísmica de edificios existentes en cualquier zona sísmica. De acuerdo a FEMA 310, antes de usar las tres metodologías proporcionadas en las pautas, debe realizarse un RVS del edificio para decidir si es necesaria una evaluación sísmica (FEMA 310, 1998).

El procedimiento RVS propuesto en FEMA 154 utiliza un sistema de puntuación que requiere que el usuario identifique la estructura primaria resistente a la carga lateral y atributos del edificio que modifican el comportamiento sísmico esperado. Los resultados se registran en un formulario de recopilación de datos según la sismicidad de la región objeto de estudio. El método asigna una puntuación estructural básica basada en la tipología estructural y utiliza modificadores de puntuación para considerar el efecto del número de pisos, el tipo de suelo, las irregularidades en planta y verticales, y detalles de código previo o posterior al código de referencia (FEMA P-155, 2015) .

En Egipto, El-Betar (El-Betar, 2018) con el procedimiento RVS de FEMA P-154, evaluó la vulnerabilidad sísmica en edificios escolares de los años 60's y escuelas construidas después de los 90's, diseñadas de acuerdo al código del país y determinaron las funciones de capacidad con un análisis pushover, utilizando el software *IDARC* versión 6, concluyeron que los edificios de los 60's tienden a ser más vulnerables bajo cargas sísmicas altas, mientras que los diseñados de acuerdo al código tienen una gran capacidad para resistir terremotos. Algunos autores presentan otras alternativas del método RVS como Achs y Adam (Achs & Adam, 2012) en Viena Austria que realizaron la evaluación sísmica de edificios históricos de mampostería de ladrillos, la metodología RVS propuesta evalúa la vulnerabilidad física y socioeconómica, de las cuales generaron mapas resultantes de escenarios de daños que brindan información útil para la planificación de emergencias y evacuación, así como para la identificación de objetos críticos vulnerables a cargas sísmicas. En la India, Rajarathnam y Santhakumar (Rajarathnam & Santhakumar, 2015) evalúan la seguridad sísmica de edificios de Chennai utilizando la técnica RVS, utilizaron fotografías aéreas para identificar irregularidades

en los edificios en un sistema de información geográfica (SIG). Kumar et al. (Ajay Kumar et al., 2017) proponen un nuevo formato modificado para realizar el RVS en el estado de Himachal Pradesh. Con la puntuación RVS, para cada tipología de vivienda obtuvieron curvas de distribución de daño para comprender la distribución de edificios en el estado (Díaz et al., 2023b).

1.8.5. Métodos analíticos para la evaluación de la vulnerabilidad

Como se observar en la Tabla 1.2 actualmente existe una gran variedad de métodos que realizan una evaluación analítica, se describen solo algunos de ellos.

Tabla 1.2. Resumen de procedimientos analíticos para la evaluación de vulnerabilidad sísmica de estructuras mampostería, adaptado de (D'Ayala, 2013).

Método	Datos requeridos	Destacado del estudio	Medida de Intensidad	Software	Referencia
FaMIVE (<i>Failure Mechanism Identification and Vulnerability Evaluation</i>)	Geometría, parámetros de materiales, detalles estructurales.	Funciones de fragilidad y funciones de vulnerabilidad	PGA Espectro de respuesta	FaMIVE	(D'Ayala & Speranza, 2003)(D'Ayala, 2005)
SP-BELA (<i>Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment</i>)	Descripción estructural	Funciones de vulnerabilidad	PGA Espectro de respuesta	SP-BELA	(Borzi et al., 2008)
CSBM (<i>Capacity Spectrum Based Methods</i>)	Descripción estructural	Funciones de fragilidad, Daños en términos estructurales y económicos	PGA Espectro de respuesta	N/A	(Kappos et al., 2008)
SELENA (<i>SEismic Loss Estimation using a logic tree Approach</i>)	Descripción tipológica, descripción estructural	Daños en términos estructurales y económicos y número de víctimas.	PGA Espectro de respuesta	SELENA	(Molina et al., 2010)
HAZUS (<i>HAZard U.S</i>)	Descripción tipológica, descripción estructural	Funciones de fragilidad, Daños en términos estructurales y económicos	PGA Espectro de respuesta	HAZUS-MH	(FEMA, 2012)
RMTK (<i>Risk Modellers' Toolkit</i>)	Descripción tipológica, descripción estructural	Funciones de fragilidad y funciones de vulnerabilidad	PGA Espectro de respuesta	RMTK	(V. Silva et al., 2015)
VMTK (<i>Vulnerability Modellers' Toolkit</i>)	Descripción tipológica, descripción estructural	Funciones de fragilidad y funciones de vulnerabilidad	PGA Espectro de respuesta	VMTK	(Martins et al., 2021)

Risk Modellers'Toolkit (RMTK)

La plataforma RMTK de *OpenQuake* desarrollada por GEM, el cual implementa diferentes métodos de vanguardia para derivar solidas funciones analíticas de vulnerabilidad y fragilidad sísmica para estructuras individuales o edificios (Figura 1.15).

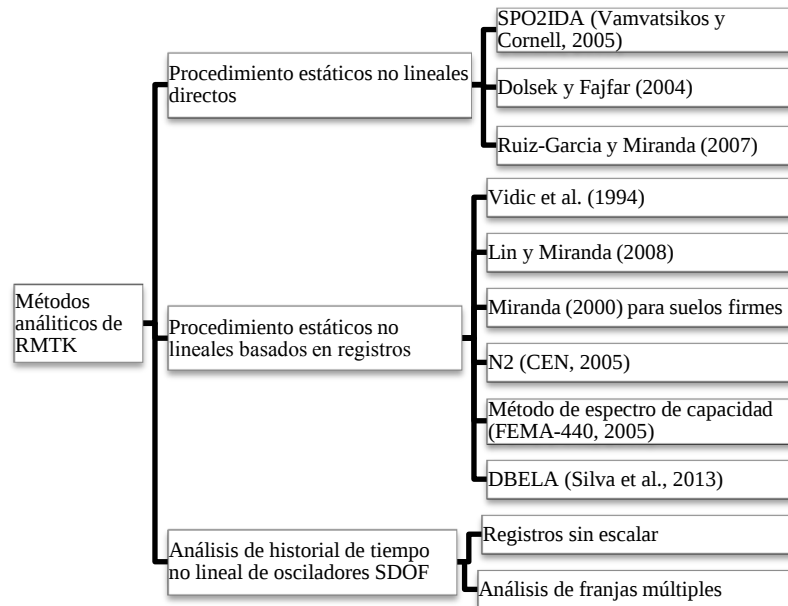


Figura 1.15. Métodos analíticos del programa RMTK para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica (V. Silva et al., 2015).

Análisis de historial de tiempo no lineal en osciladores de un grado de libertad

Esta metodología realiza una serie de análisis de historial de tiempo no lineales (NLTHA) sobre uno o varios sistemas de un solo grado de libertad (SDOF) (Tabla 1.3). Para determinar la capacidad estructural de los sistemas de múltiples grados de libertad (MDOF) bajo análisis, es necesario identificar la relación entre el cortante de la base y el desplazamiento del techo (es decir, la curva de *pushover*). Esta curva debe convertirse luego a la curva de capacidad de un oscilador SDOF equivalente. Para edificios de baja y media altura, se asume típicamente que el modo fundamental de vibración corresponde a la respuesta predominante de la estructura. Bajo esta hipótesis, el oscilador SDOF representa el primer modo de respuesta de la estructura. Esto suele ser válido para edificios con periodos fundamentales de vibración de hasta aproximadamente 1.0 s. De lo contrario, deben tenerse en cuenta los modos superiores (V. Silva et al., 2015).

En esta metodología, la demanda está representada por un conjunto de registros de movimiento del suelo. La respuesta de cada estructura viene dada por la solución de la ecuación 1.2 de movimiento para un SDOF inelástico bajo excitación sísmica:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p(t) \quad (1.2)$$

Donde u , $\dot{u}$ y $\ddot{u}$ representan el desplazamiento, la velocidad y la aceleración respectivamente, en el tiempo (t), y p representa una excitación externa. El análisis del historial de tiempo no lineal se realiza utilizando el software de código abierto para análisis estructural *OpenSees* (Mazzoni et al., 2006).

Tabla 1.3. Resumen de métodos de análisis de historial de tiempo no lineal en osciladores de un grado de libertad del programa RMTK.

Método	Requerimientos de entrada	Requerimientos del registro de movimiento sísmico	Resultado
Registros sin escalar	1. Proporcionar una o múltiples funciones de capacidad. 2. Funciones de capacidad idealizadas por cinco puntos Sd-Sa relevantes. 3. Coeficiente de amortiguamiento 4. Periodo de la estructura 5. Grado de degradación en la regla cíclica 6. Modelo de daños 7. Respuesta de cada sistema SDOF en términos de desplazamiento	Conjunto de registros de movimientos de tierra sin escalar	Determina el comportamiento de histéresis del material (<i>Pinching4 OpenSees</i>). Determina matrices de probabilidad de daño (DPM), que representan el número de estructuras en cada estado de daño por cada intensidad de registro de movimiento del suelo. Desplazamientos espectrales SDS que representa un vector con el desplazamiento máximo de cada estructura por registro de movimiento del suelo. La variable DPM se puede utilizar para calcular el modelo de fragilidad media.
Análisis de franjas múltiples rayas (<i>Multiple Stripe Analysis</i> , MSA) (F Jalayer, 2003)		Conjunto de registros de movimiento de tierra que se escalan a múltiples niveles de medida de intensidad	La respuesta del sistema SDOF a cada registro de movimiento del suelo se utiliza para determinar la Matriz de probabilidad de daños (DPM). En este caso, el DPM representa el número de registros que llevan a la estructura a cada estado de daño para la medida de intensidad de cada franja de respuestas. Con MSA es posible derivar funciones de fragilidad también para una sola estructura. Alternativamente, se pueden ingresar más funciones de capacidad y se suman los DPM de los sistemas SDOF correspondientes para obtener un DPM único para la clase de edificio.

Estudios previos que utilizaron RMTK

Algunos investigadores que desarrollaron funciones de fragilidad y vulnerabilidad de distintas clase de edificio obteniendo buenos resultados a través del análisis de historial de tiempo no lineal, utilizando la plataforma de modelado de riesgo de GEM (*GEM's Risk Modeller's Toolkit*).

En la ciudad de Antioquia, Colombia, realizaron una evaluación de riesgo sísmico, en edificios de mampostería no reforzada (Figura 1.16), para la cual desarrollaron un modelo de exposición que se basa en la información disponible catastral, datos de encuestas, y la opinión de expertos, si la información no era accesible recurrieron a una encuesta virtual realizada por *Google Street View*. Calcularon las funciones de capacidad mediante un análisis *pushover*, para posteriormente desarrollar las funciones de fragilidad de cada edificio. Los escenarios considerados que podrían tener lugar en la región de interés, se realizaron con el *software OpenQuake*, los resultados que obtuvieron indican que alrededor del 20% del inmobiliario total de las estructuras de mampostería no reforzada sufriría grandes daños a colapsar, siendo las estructuras de cuatro a seis niveles las construcciones más vulnerables (Acevedo et al., 2017).



Figura 1.16. Ejemplos de estructuras de mampostería no reforzada de Antioquia Colombia (Acevedo et al., 2017).

Mediante un enfoque analítico, se desarrollaron las funciones de fragilidad y vulnerabilidad para la mayoría de las clases de construcción comunes en el mundo. Obtenidos de una encuesta mundial (50 países) se consideraron cerca de doscientas clases de construcciones. Los modelos de fragilidad se desarrollaron para diferentes ambientes tectónico se consideraron dos conjuntos de modelos, uno para la corteza superficial activa y otro para subducción. Después de haber probado y calibrado los modelos de fragilidad para proporcionar estimaciones fiables de riesgo sísmico se cree que la base de datos resultante podría ser utilizada como un estándar para la comparación con los modelos existentes o como una entrada para el análisis de riesgo sísmico para regiones donde hay otros modelos disponibles (Martins & Silva, 2018).

En la región andina (Argentina, Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela)(Villar-Vega et al., 2017) realizaron un modelo de fragilidad uniforme para 54 clases de construcciones representativas para el análisis de riesgo a gran escala. Todas las funciones de fragilidad están disponibles públicamente a través de la base de datos de vulnerabilidad GEM en la plataforma *OpenQuake* (<http://platform.openquake.org>). A pesar de la utilidad de estos modelos, es importante reconocer sus limitaciones y su rango de aplicabilidad. Estas funciones de fragilidad no capturan las características específicas del inventario de construcción a nivel local. Para la evaluación de las pérdidas por terremoto a escala local, se deben considerar los modelos derivados utilizando una metodología más detallada y considerando las características locales del inventario de edificios.

A una escala mundial Martins y Silva hicieron la clasificación de las construcciones más comunes y realizaron el desarrollo de un modelo analítico de fragilidad y vulnerabilidad que comprende el total de las construcciones (Martins & Silva, 2020). Cerca de quinientas funciones para cubrir la mayoría de materiales diferentes de construcción, altura, sistema resistente a carga lateral y nivel de diseño sísmico, fueron desarrolladas. Las funciones de fragilidad y de vulnerabilidad se derivaron utilizando análisis de tiempo-historia no lineales en osciladores equivalentes de un solo grado de libertad y un gran conjunto de registros de movimiento del suelo que representan varios entornos tectónicos. Las funciones resultantes se validaron a través de una serie de pruebas que incluyen el cálculo de la tasa de pérdida anual promedio para varios lugares, la comparación de probabilidades de colapso en todas las clases de edificios y la repetición de eventos sísmicos pasados. El conjunto de funciones de vulnerabilidad se utilizó para la evaluación de pérdidas económicas debido a terremotos como parte del modelo de riesgo sísmico global respaldado por GEM.

Vulnerability Modellers' Toolkit (VMTK)

VMTK es una plataforma integral para desarrollar modelos de fragilidad y vulnerabilidad al tiempo que permite una amplia flexibilidad en términos de demanda sísmica, capacidad estructural, criterios de daño y conversión de daño a pérdida, desarrolladas por la Fundación *Global Earthquake Model* (GEM). Esta desarrollada en el lenguaje de programación *Python*, con el fin de garantizar que se pueda integrar fácilmente con otro software que comparta el mismo lenguaje de programación (por ejemplo, *OpenQuake*, *OpenSees*) y para aprovechar las diversas bibliotecas científicas (por ejemplo, *SciPy*, *NumPy*). Incluye una interfaz gráfica de usuario (GUI) con capacidades de trazado con el kit de herramientas.

Esta plataforma también integra en su flujo de trabajo, cuestiones críticas en el modelado de vulnerabilidades relacionadas con la propagación de fuentes de incertidumbre (por ejemplo, registro a registro, edificio a edificio, criterio de daños), validaciones / verificación de las funciones resultantes a través de métricas de riesgo (por ejemplo, índices de pérdidas anuales promedio) y evaluación del desempeño de las medidas de intensidad elegidas en términos de suficiencia y eficiencia.

VMTK está dividida en seis módulos destinados a proporcionar un flujo de trabajo lógico a través de las diferentes etapas del modelado analítico de vulnerabilidades utilizando análisis dinámicos no lineales. Estos módulos están organizados en: (i) selección de registros de movimiento del suelo, (ii) definición de capacidad estructural, (iii) análisis dinámicos no lineales en osciladores de grado único de libertad (SDOF) para estimar la respuesta del edificio a cargas sísmicas, (iv) conversión de los resultados de los análisis dinámicos en funciones de fragilidad, (v) derivación de funciones de vulnerabilidad, y (vi) validación de los resultados mediante el cálculo de pérdidas promedio anuales y otras métricas de riesgo comunes.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1. Introducción

Algunos conceptos y antecedentes en la zona de estudio, al noroeste de Baja California en la ciudad de Tijuana principalmente, se han presentado en el primer capítulo, relacionados con el riesgo sísmico y se han comentado los alcances de este estudio, cuyos objetivos se centran en las pérdidas debido a sismos para viviendas de mampostería.

Este capítulo segundo integra los componentes para determinar la vulnerabilidad específica de las edificaciones destinadas para vivienda en la ciudad de Tijuana, está fundamentada en el análisis propio de los elementos expuestos, métodos y técnicas que comprende el entendimiento de los sistemas constructivos, características de sus materiales, su comportamiento dinámico, así como, la comprensión e integración del movimiento fuerte del terreno a través de sus ecuaciones predictivas.

2.2. Vulnerabilidad sísmica

Actualmente en la región no existen funciones de fragilidad y vulnerabilidad para ningún tipo de estructura, por lo que con esta componente se tiene el objetivo de obtener las funciones específicamente para viviendas de mampostería reforzada en la ciudad de Tijuana, mediante un análisis probabilista y se realizará por medio de la plataforma VMTK (Martins et al., 2021).

La integración del modelo metodológico para determinar la vulnerabilidad lo observamos en la Figura 2.1, en donde el proceso comienza con la generación de una población de viviendas de mampostería reforzada a través de la simulación de Monte Carlo. Luego la muestra de viviendas sintéticas se somete a un conjunto de registros de movimiento del terreno mediante el uso de análisis estático o dinámico. En el análisis estático, se genera una curva *pushover* para cada vivienda y se transforma en una curva de capacidad de un sistema equivalente de un grado de libertad. En el análisis dinámico, a cada vivienda se le asigna un estado de daño global en función del desplazamiento máximo del techo registrado durante el análisis de historial de tiempo no lineal, que nuevamente se compara con los desplazamientos del estado límite. Por lo tanto para cada registro, se obtendrá el número de viviendas en cada estado de daño (V. Silva et al., 2014).

Después de realizar los análisis estructurales, con la herramienta VMTK se produce una distribución de los parámetros de demanda de ingeniería (EDP) versus a los niveles de medida de intensidad (IM), que luego se utilizan para la derivación de las funciones de fragilidad. Una vez definida la relación entre la respuesta estructural y la intensidad del movimiento del terreno, las funciones de fragilidad se derivan utilizando el enfoque de análisis de nubes propuesto por (Fatemeh Jalayer et al., 2015). También se ha implementado el algoritmos de regresión de VMTK, en el caso donde, los desplazamientos considerados excesivamente altos se tratan de manera diferente mediante un análisis de regresión censurado (Stafford, 2008). Cada conjunto de

funciones de fragilidad se ha combinado con un modelo de consecuencia, que relaciona el daño físico con el porcentaje de pérdida para obtener las funciones de vulnerabilidad.

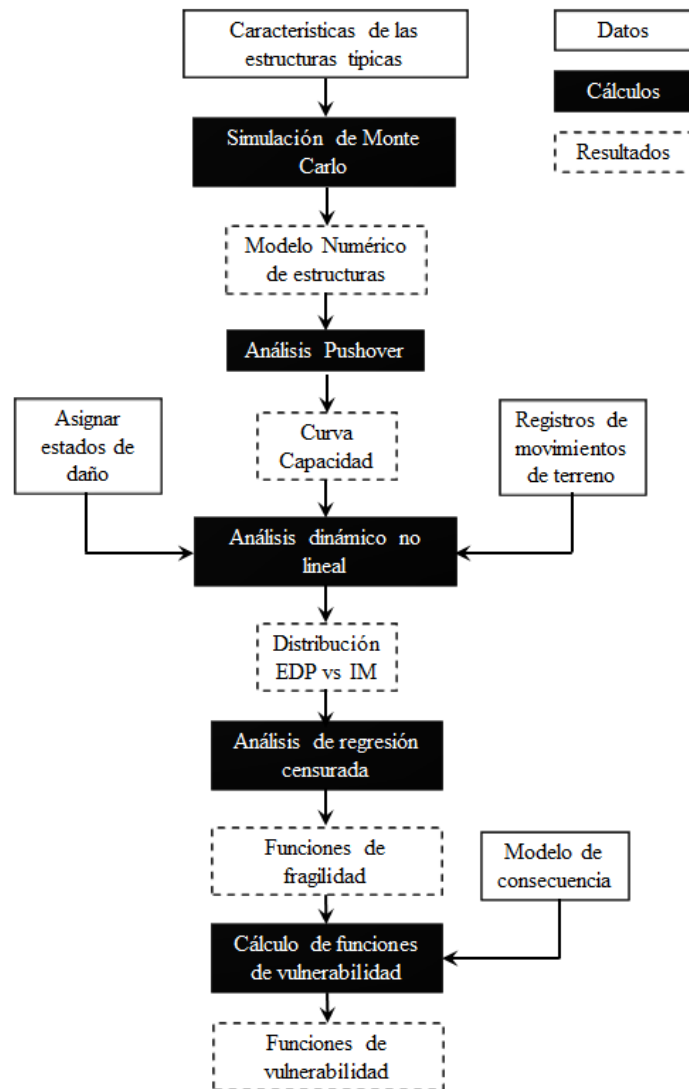


Figura 2.1. Esquema de pasos para obtener las funciones de vulnerabilidad, Adaptado de (V. Silva et al., 2014).

2.3. Elementos expuestos

A nivel nacional, estatal y municipal los materiales de construcción más comunes con base en la distribución del inventario de viviendas son: mampostería (tabique, ladrillo, bloque, piedra y concreto), madera o adobe y otros (materiales de desecho, cartón, bajareque, lámina de asbesto o metálica, carrizo y material no especificado) (Figura 2.2) (INEGI, 2017).

El objetivo en esta componente es obtener los indicadores socioeconómicos, hacer un inventario físico y clasificación de las viviendas con el material de construcción más común en la ciudad de Tijuana, Baja California, mediante la realización del modelo de exposición, utilizando la información proporcionada por el censo nacional de población y vivienda, encuestas virtuales y opiniones de expertos locales.

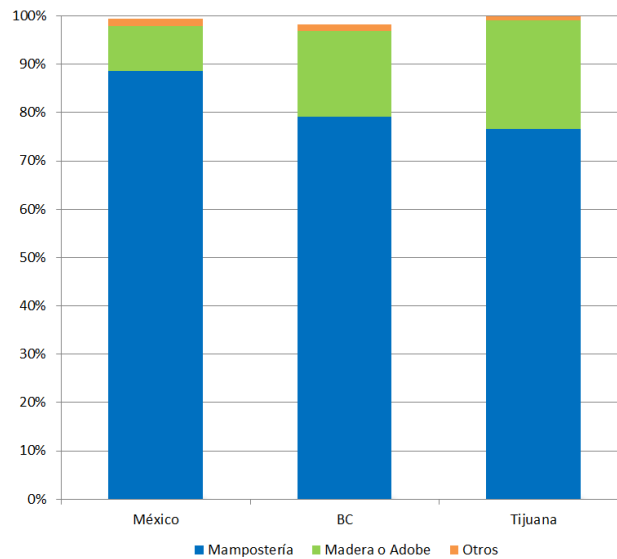


Figura 2.2. Distribución del inventario de vivienda según la construcción más común (Romero, 2020).

2.3.1. Información del inventario en Tijuana

Teniendo como base, la encuesta intercensal de viviendas en la ciudad de Tijuana que se llevó a cabo en el 2015, con el fin de obtener la información del inventario de la ciudad, incluye: el sistema constructivo, tipo de vivienda, número de niveles, año de construcción y costo de reposición.

Sistema constructivo

Como se presenta en la Tabla 2.1, la mampostería y losas de concreto son los materiales de construcción en paredes y techos más comunes en la ciudad de Tijuana representando más del 76% y 60% del número total de viviendas respectivamente. Por lo tanto, desde el punto de vista de la modelización en la ciudad, las viviendas de mampostería (Figura 2.3) deben recibir atención especial.

Tabla 2.1. Viviendas particulares habitadas en Tijuana y su distribución porcentual según el tipo de materiales en (a) paredes y (b) techos (INEGI, 2017).

Municipio	Total ⁽¹⁾	(a) Tipos de materiales en paredes (Porcentaje)				
		Materiales de desecho o cartón	Embarro o bajareque, lámina de asbesto o metálica, carrizo	Madera o adobe	Mampostería (Tabique, ladrillo, bloque, piedra, y concreto)	Material no especificado
Tijuana	474 316	0.36	0.35	22.48	76.61	0.19

Municipio	Total ⁽¹⁾	(b) Tipos de materiales en techos (Porcentaje)				
		Materiales de desecho o cartón	Lámina metálica, lámina de asbesto, lamina de fibrocemento, palma o paja, madera	Teja o terrado con vigería	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Material no especificado
Tijuana	474 316	0.45	38.36	0.25	60.76	0.18

⁽¹⁾ Excluye las siguientes clases de vivienda: locales no contruidos para habitación, viviendas móviles y refugios.



Figura 2.3. Viviendas típicas de mampostería de la ciudad de Tijuana (1 a 5 pisos).

Tipo de vivienda

El tipo de vivienda se divide en cinco categorías en el censo (Tabla 2.2), donde en su mayoría son casas con más del 88%. Además se realizó la caracterización de más de 4 850 viviendas en toda la ciudad de Tijuana, donde se clasificaron las casas en tres tipos: interés social, nivel medio y residencial (Figura 2.4). Esta última distinción es importante en un modelo con el fin de hacer predicciones de las pérdidas económicas.

Tabla 2.2. Viviendas particulares habitadas en Tijuana y su distribución porcentual según clase de vivienda (INEGI, 2017).

Municipio	Total	Clase de vivienda particular (Porcentaje)				
		Casa ⁽¹⁾	Departamento en edificio	Vivienda en vecindad o cuartería	Otro tipo de vivienda ⁽²⁾	No especificado
Tijuana	475 341	88.65	6.40	4.21	0.24	0.50

⁽¹⁾ Incluye las siguientes clases de vivienda: casa única en el terreno, casas que comparte terreno con otra(s) y casa dúplex, triple o cuádruple.

⁽²⁾ Incluye las siguientes clases de vivienda: cuarto en la azotea de un edificio, local no construido para habitación, vivienda móvil y refugio.

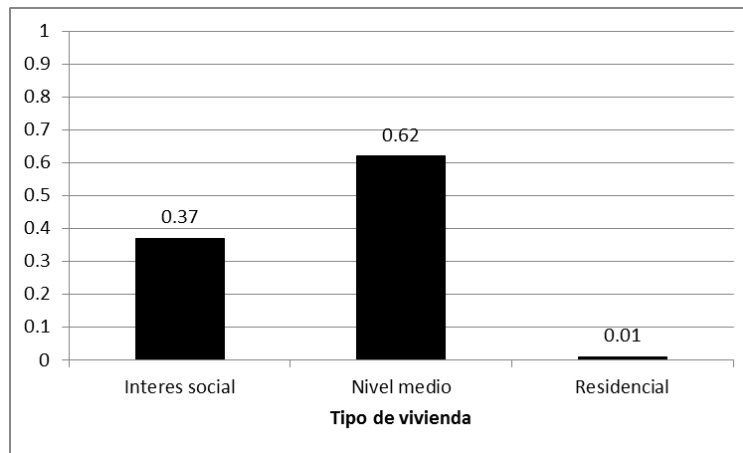


Figura 2.4. Porcentaje de los diferentes tipos de viviendas en la ciudad de Tijuana (Díaz et al., 2023a).

Número de pisos

Para determinar el número de pisos, al no existir este dato en el censo, se recurrió a realizar una encuesta virtual para la recopilación de este, obteniendo el área de más de 4 850 viviendas seleccionadas al azar (se tomó una muestra representativa de viviendas de un total de 573 conjuntos de manzanas de la ciudad de Tijuana), utilizando imágenes disponibles en la aplicación *Google Street View* y el mapa digital de México (<http://gaia.inegi.org.mx/>). Cada vivienda se ha colocado en una de las siguientes categorías : 1 pisos, 2 pisos y 3 a 5 pisos (Figura 2.5).

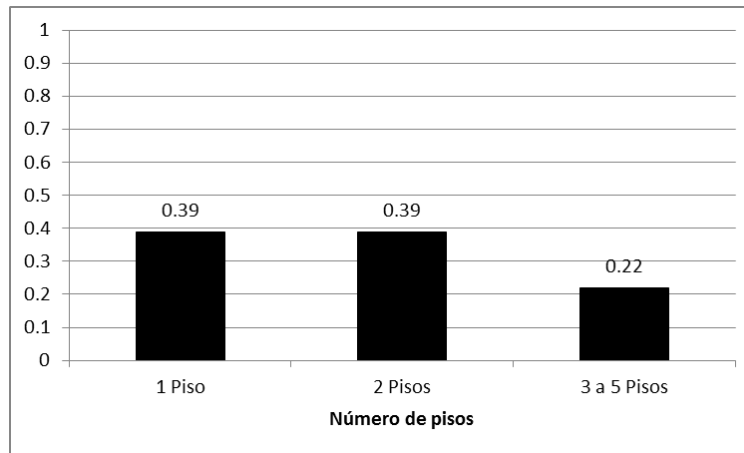


Figura 2. 5. Porcentaje de viviendas para las diferentes alturas en la ciudad de Tijuana (Díaz et al., 2023a).

Año de construcción

El año de construcción se obtuvo de los censos de INEGI utilizando el rango entre 1950 y 2020 (Figura 2.6). Esta información puede ser importante para evaluar la vulnerabilidad de los edificios existentes, con el año de construcción se puede usar para hallar el código de diseño estructural que estaba vigente en el momento de construcción. Sin embargo, cabe señalar que muchos edificios en la región de Tijuana se han construido de manera informal sin ajustarse a los códigos de diseño.

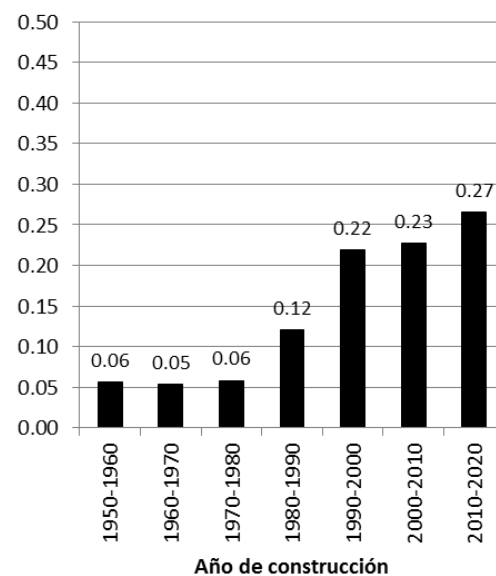


Figura 2.6. Porcentaje de viviendas en términos de años de construcción de Tijuana (Díaz et al., 2023a).

Costo de reposición

El costo de la vivienda no se ve reflejado en los censos realizados cada diez años, por lo que se definió en función del área de construcción tomada de las encuestas virtuales (Figura 2.7). Independientemente del sistema estructural, se consideraron los siguientes costos de reposición: Para casas de interés social \$6 413.03 m.n. (pesos mexicanos) (320 USD) por m², casas de nivel medio \$8 680.40 m.n. (434 USD) por m² y casas residenciales \$13 478.89 m.n. (673 USD) por m². Estos valores se definieron en base en el juicio de expertos del Colegio de Valuadores de Baja California A.C. del año 2018.



Figura 2.7. Encuesta virtuales en Mapa Digital de México para determinar área de viviendas.

2.3.2. Clasificación de construcciones en viviendas de mampostería

Según el censo 2020 de la ciudad de Tijuana, hay 576 708 viviendas. Del total de las viviendas el 88.65% son casas de 1-5 pisos. La distribución de las viviendas según los materiales más comúnmente utilizados para la construcción son: Mampostería, Madera o Adobe y Otros (Materiales de desecho, cartón, bajareque, lamina de asbesto o metálica, carrizo y material no especificado), el material de mampostería representan más del 75% del total de viviendas. Por lo que se ha realizado la clasificación de construcción en viviendas de mampostería, se han dividido considerando también su nivel esperado de ductilidad y número de pisos para los diferentes niveles de diseño sísmico.

Muros verticales en el sistema resistente a fuerzas laterales (LWAL)

Un muro es un elemento de construcción plano vertical que generalmente resiste cargas de gravedad, pero también resiste fuerzas horizontales y proporciona estabilidad a una vivienda durante un terremoto. Los muros, resisten la gran mayoría de la carga lateral. Estos pueden comprender varios materiales, como en el

caso de la construcción de mampostería confinada con su sistema de muros de mampostería, columnas y vigas de confinamiento de concreto reforzado.

Mampostería confinada (MCF)

Las construcciones de mampostería confinada son: donde primero se colocan muros de mampostería y luego se vierten elementos de confinamiento de concreto reforzado horizontales y verticales. En este tipo de construcción, el concreto se adhiere a la mampostería y las columnas y vigas de tamaño pequeño (llamadas columnas de unión y vigas de unión) confinan los paneles de pared de mampostería. La mampostería confinada se puede clasificar como el sistema resistente a cargas laterales de muro, ya que la mampostería soporta cargas laterales y de gravedad y las columnas y vigas esbeltas no constituyen marcos rígidos sino que funcionan como elementos de confinamiento (Figura 2.8).

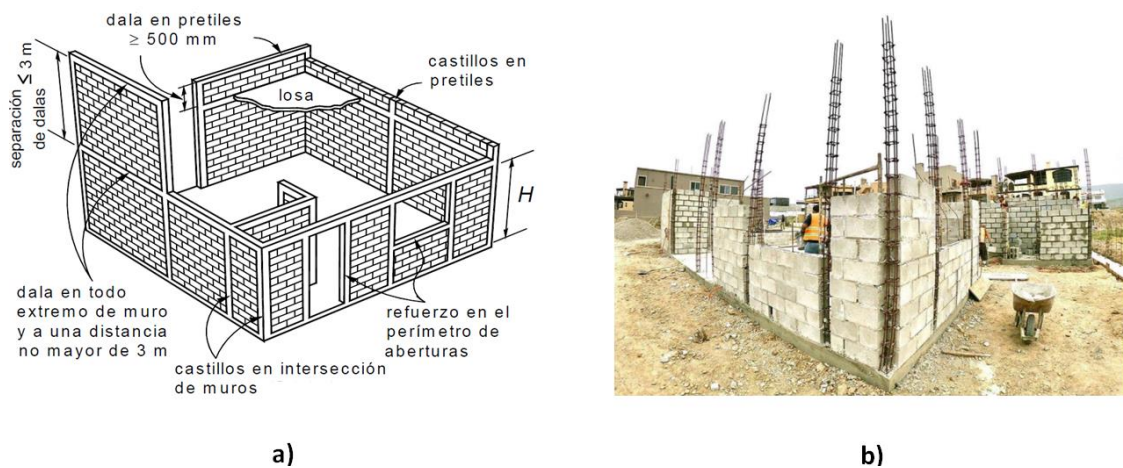
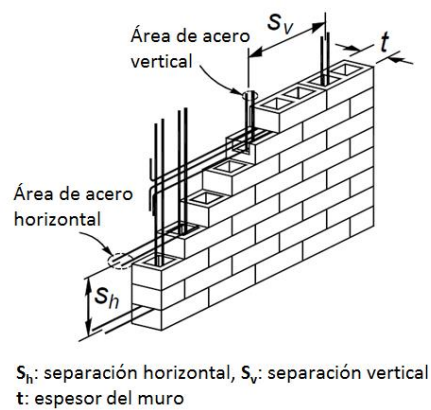


Figura 2.8. Construcción de mampostería confinada: a) requisitos para mampostería confinada (NTCBC, 2017), y b) secuencia constructiva de vivienda de mampostería confinada en Baja California.

Mampostería reforzada (MR)

La construcción de mampostería reforzada son: muros de mampostería en la que el refuerzo está incrustado de tal manera que dos materiales actúan juntos para resistir fuerzas. El refuerzo resiste la tensión mientras que la mampostería resiste la compresión. El refuerzo puede adoptar diversas formas, como varillas internas de acero embebidas en unidades de mampostería o colocadas en capas de mortero horizontales (Figura 2.9).



a)



b)

Figura 2.9. Construcción de mampostería reforzada: a) requisitos para mampostería reforzada (NTCBC, 2017), y b) secuencia constructiva de vivienda de mampostería reforzada en Baja California.

Diseño dúctil (DUC)

La estructura incorpora un diseño dúctil, donde los miembros con refuerzo de acero están diseñados para sufrir deformación plástica en situaciones de sobrecarga antes de que suceda la falla por cargas sísmicas en los elementos estructurales o sus conexiones. Se espera que los muros de mampostería reforzada con la cantidad de refuerzo y detalles adecuados muestren un comportamiento sísmico dúctil.

Diseño no dúctil (DNO)

Este ocurre cuando los miembros con acero de refuerzo no están diseñados ni construidos para sufrir deformación plástica antes de fallar bajo cargas sísmicas. En caso de sobrecarga durante un terremoto, se espera que los miembros estructurales sufran una falla por fragilidad. Los edificios de mampostería no reforzada por lo general muestran un comportamiento no dúctil en los terremotos (Figura 2.10).



Figura 2.10. Daño de viviendas de mampostería confinada mal construido en el terremoto de Mexicali BC de 2010; esto se considera un rendimiento no dúctil (Martínez & Martínez, 2010).

Nivel de diseño sísmico

Para cada tipología de construcción se define y asigna el nivel de diseño sísmico. Para el diseño de la estructura este parámetro define el nivel de demanda sísmica y la capacidad de deformación horizontal (Cardona et al., 2013). Se consideran las siguientes categorías:

Diseño sísmico Alto, H: La estructura cumple con todos los requisitos sísmicos de normas nacionales e internacionales en relación con la capacidad de carga y la capacidad de deformación horizontal o ductilidad en zonas de amenaza alta sísmica.

Diseño sísmico Moderado, M: Las especificaciones sismorresistente de la estructura están asociadas a un nivel medio de cumplimiento.

Diseño sísmico Bajo, L: La estructura no cumple en general los requisitos mínimos de diseño sismorresistente.

Taxonomía de viviendas de mampostería en Tijuana

En la tabla 2.3 se muestra un resumen de la clasificación de construcción de viviendas de mampostería de 1-5 pisos en la ciudad de Tijuana, donde los muros verticales son el sistema resistente a fuerzas laterales, los cuales pueden ser de mampostería confinada o reforzada, para diseño dúctil y no dúctil, considerando los diferentes niveles de diseño sísmico en cada una de las taxonomías.

Tabla 2.3. Clasificación de construcción en viviendas de mampostería en la ciudad de Tijuana.

Taxonomía⁽¹⁾	Descripción Tipología
MCF/LWAL/DUC/H:1-5/L-M-H	Mampostería confinada, dúctil de 1-5 pisos
MCF/LWAL/DNO/H:1-5/L-M-H	Mampostería confinada, no dúctil de 1-5 pisos
MR/LWAL/DUC/H:1-5/L-M-H	Mampostería reforzada, dúctil de 1-5 pisos
MR/LWAL/DNO/H:1-5/L-M-H	Mampostería reforzada, no dúctil de 1-5 pisos

⁽¹⁾MCF: Mampostería confinada, MR: Mampostería reforzada, LWAL: Muros verticales en el sistema resistente a fuerzas laterales, DUC: Dúctil, DNO: No Dúctil, H: Número de niveles, Nivel de diseño sísmico L:Bajo, M:Moderado, H:Alto.

2.4. Peligro sísmico

En esta sección se describen más detalladamente los pasos definidos por Cornell para el cálculo de peligro sísmico.

2.4.1. Caracterización de las fuentes sísmicas

De manera similar a DSHA, el primer paso de PSHA consiste en la definición del modelo de sismicidad de la región de interés mediante líneas o zonas fuente. Sin embargo, como la ruptura de la falla puede ocurrir en cualquier punto dentro de la zona sísmica, la incertidumbre espacial en la ubicación del terremoto se toma en cuenta a través de funciones de densidad de probabilidad de la distancia del sitio al punto de ruptura. Aunque se pueden utilizar diferentes funciones de probabilidad, se acostumbra adoptar una distribución de probabilidad uniforme en la que todos los puntos dentro de la fuente sísmica tienen la misma probabilidad de romperse [Probabilidad de que $R=r$] (Bhattacharya et al., 2019).

Para este caso se utilizaron fuentes lineales, la caracterización de estas en eventos sísmicos consiste en definir la geometría de la falla y calcular la distribución de probabilidad de las distancias que hay entre los sismos que ocurren en esta falla y el sitio donde se está evaluando el peligro [Probabilidad de que $R = r$].

La longitud de la línea de fuentes identificada se discretiza en un número grande de pequeñas celdas igualmente espaciadas. Se supondrá que en los puntos centrales de estas celdas, ubicados a diferentes distancias del sitio de observación, podrá ocurrir un cierto número de sismos con magnitudes en un intervalo limitado por una magnitud mínima y una magnitud máxima. En la Figura 2.11 se muestra una fuente lineal de 120 km dividida en 120 celdas ($n=120$) con separación de 1 km entre sus puntos centrales. Se calculan las distancias que hay entre el sitio de interés y cada uno de los puntos centrales de las celdas sobre la falla, es decir, a las 120 ubicaciones de posibles fuentes sísmicas sobre la falla. En toda situación, siempre habrá una distancia máxima y una distancia mínima de las fuentes más alejadas y más cercana al sitio donde se evalúa el peligro sísmico. Si la diferencia que hay entre la distancia máxima y la distancia mínima se divide en un número arbitrario, se obtiene como resultado un número de intervalos de distancia de igual longitud. En este caso la distancia máxima (90 km) se le resta la distancia mínima (20 km), y el resultado se dividió arbitrariamente entre siete ($N_R=7$), dando como resultado siete intervalos de 10 km de longitud cada uno. Con esto, la distancia entre el sitio en estudio y cualquier punto sobre la línea de fuente tendrá que estar incluida en alguno de los intervalos así definidos. En este punto, es importante señalar que mientras mayor sea N_R será también la precisión en los cálculos que se realicen. El diagrama de barras en la Figura 2.12 muestra tanto la contabilización de distancias por intervalo como la correspondiente probabilidad de que los sismos ocurran a la distancia media del intervalo, $R=r$ (Arce, 2016).

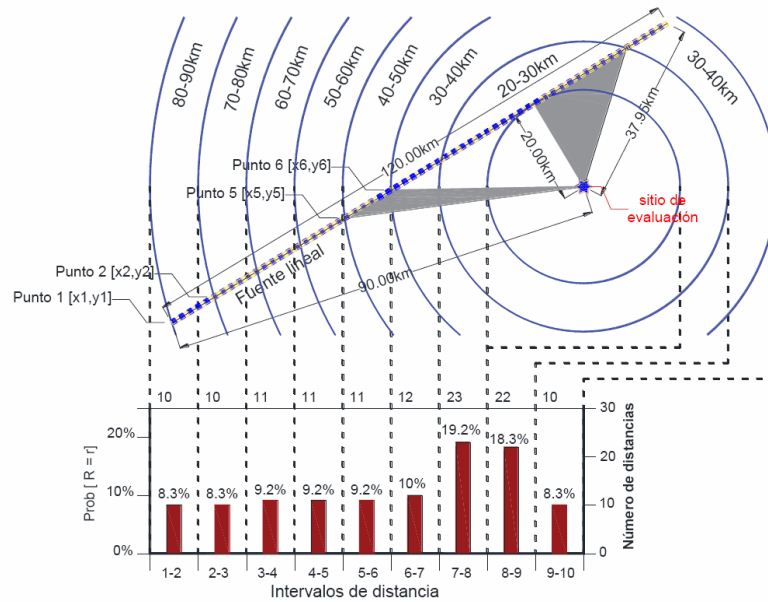


Figura 2.11. Diagrama de la determinación de la distribución de probabilidad de distancia para una fuente lineal (Arce, 2016).

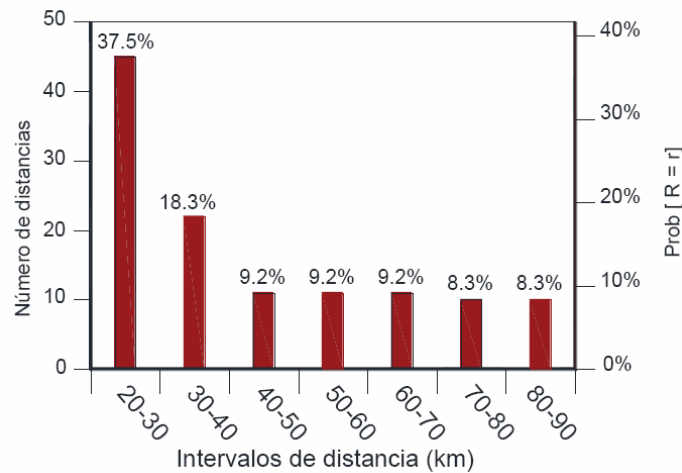


Figura 2.12. Distribución de probabilidades de que $R=r$, del ejemplo de la Figura 3.3 (Arce, 2016).

2.4.2. Caracterización de la sismicidad

El analista de amenazas sísmicas ahora necesita cuantificar y tener en cuenta la incertidumbre en el tamaño de los terremotos, normalmente expresada en términos de M_w , que cada fuente sísmica puede producir. Es habitual expresar el tamaño de los terremotos futuros a través de leyes de recurrencia que proporcionan la tasa

de ocurrencia de terremotos con una magnitud mayor o igual a un cierto valor umbral (Bhattacharya et al., 2019). Aunque se dispone de varias leyes de recurrencia, el modelo de Gutenberg-Richter (Gutenberg & Richter, 1944) se utiliza normalmente para cuantificar la tasa media anual de excedencia λ_m de un terremoto de magnitud M a través de la ley de potencia dada por

$$\log_{10} \lambda_m = a - bM \quad (2.1)$$

O, alternativamente

$$\lambda_m = 10^{(a-bM)} \quad (2.2)$$

donde 10^a es el número medio anual de terremotos de magnitud cero, o el número de terremotos de menor magnitud M_{min} que se espera que produzca la falla causante, y b es la proporción relativa de eventos sísmicos fuertes a moderados. La ley de Gutenberg-Richter original consideró un rango de magnitud de $-\infty$ a $+\infty$; sin embargo, es de interés práctico considerar terremotos en el rango de magnitud que puede ser producido de manera realista por la falla causante. λ_m de terremotos en el rango de magnitud M_{min} a M_{max} viene dado por (Bhattacharya et al., 2019)

$$\log \lambda_m = v \frac{\exp[-\beta(M - M_{min})] - \exp(M_{max} - M_{min})}{1 - \exp(M_{max} - M_{min})} \quad (2.3)$$

Donde $v = \exp(\alpha - \beta M_{min})$, α y β son parámetros utilizados en la ley Gutenberg-Richter, dado por

$$\alpha = 2.303a \text{ y } \beta = 2.303b.$$

Conociendo la tasa de ocurrencia de todos los posibles terremotos producidos por cada fuente sísmica, los escenarios sísmicos calculados finalmente se pueden expresar en términos de pares de magnitud-distancia M-R.

2.4.3. Ecuaciones predictivas de movimiento de suelos

A continuación, se calculan los parámetros relevantes del movimiento del suelo utilizando relaciones de atenuación teniendo en cuenta todos los posibles escenarios de terremotos: todos los pares de M-R.

En este trabajo se utilizó la ecuación predictiva de (Boore & Atkinson, 2008) disponible para la región oeste de Estados Unidos. Esta ecuación, que es parte de la Nueva Generación de Modelos de Atenuación (NGA), se expresa como:

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \epsilon \sigma_T \quad (2.4)$$

Donde, F_D y F_S representan, funciones de magnitud, de distancia y de la amplificación del movimiento sísmico en el sitio, respectivamente. M es la magnitud de momento sísmico, R_{JB} es la distancia Joyner-Boore (definida como la distancia más cercana a la proyección de la falla en la superficie) y V_{S30} es el promedio de la

velocidad de ondas de corte en los primeros 30 m de la corteza. El parámetro ε es un número de desviaciones estándar que se añaden al valor medio del parámetro Y para llevar la intensidad del movimiento sísmico a niveles más altos o más bajos de su valor medio. El coeficiente σ_T es dependiente del periodo (Boore & Atkinson, 2008).

Esta ecuación permite calcular el valor medio del parámetro de interés y proporciona su respectiva desviación estándar. Utilizando el valor medio y la desviación estándar, podemos calcular la probabilidad de excedencia de cierto valor del parámetro seleccionado usando la función de probabilidad estandarizada (Arce, 2016).

2.4.4. Ecuación de peligro sísmico

El paso final consiste en desarrollar las curvas de peligro sísmico que expresan la probabilidad media anual de excedencia en un sitio en particular, teniendo en cuenta el riesgo agregado de diferentes escenarios de terremotos. La probabilidad anual de excedencia para un valor dado, y^* , del parámetro de movimiento del suelo Y para todos los pares posibles M - R viene dada por

$$\lambda_{y^*} = \iint P[Y > y^* | M, R] f_M(M) dM f_R(R) dR \quad (2.5)$$

Donde $f_M(M)$ y $f_R(R)$ son las funciones de densidad de probabilidad del momento y la distancia entre la fuente y el sitio, respectivamente. Para el número de fuentes de terremotos N_s , la probabilidad de excedencia se puede calcular como

$$\lambda_{y^*} = v_i \sum_{i=1}^{N_s} \iint P[Y > y^* | M, R] f_{Mi}(M) dM f_{Ri}(R) dR \quad (2.6)$$

La solución numérica de las integrales de la ecuación 2.6 no es trivial. Sin embargo, una solución de forma cerrada se puede establecer discretizando el problema en N_M intervalos de magnitud ΔM , y N_R intervalos de distancias de fuente a sitio ΔR , como

$$\lambda_{y^*} = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} v_i P[Y > y^* | M_j, R_k] f_{Mi}(M_j) \Delta M f_{Ri}(R_k) \Delta R \quad (2.7)$$

Donde

$$M_j = M_{min} + \frac{(j + 0.5)(M_{max} - M_{min})}{N_M} \quad (2.8)$$

$$R_k = R_{min} + \frac{(k + 0.5)(R_{max} - R_{min})}{N_R} \quad (2.9)$$

$$\Delta_M = \frac{M_{max} - M_{min}}{N_M} \quad (2.10)$$

$$\Delta_R = \frac{R_{max} - R_{min}}{N_R} \quad (2.11)$$

A partir de la curva de razón media anual se pasa a una curva de probabilidad mediante el uso de la distribución de *Poisson*. El modelo de *Poisson* describe la probabilidad de que cierto número de eventos se logren en un periodo de tiempo dado (Kramer, 1996)

Esta distribución de probabilidad se denota como:

$$P(N = n) = \frac{(\mu)^n e^{-\mu}}{n!} \quad (2.12)$$

Donde $P(N = n)$ representa la probabilidad de que la variable aleatoria N , presente n número de ocurrencias en un periodo de tiempo dado. En este caso μ es el número promedio de veces que ocurre un evento en un cierto tiempo.

Al suponer que la ocurrencia de sismos sigue un proceso estacionario que se ajusta al modelo de *Poisson*, es decir, que la sismicidad que ha ocurrido en el pasado será similar a la que ocurrirá en el futuro, y que cada evento es independiente del anterior definimos (T) como el número de eventos que tienen lugar en el intervalo de tiempo de exposición T (variable aleatoria). Entonces, la probabilidad de que ocurran k eventos en un tiempo T está dada por:

$$P(N(T) = k) = \frac{(\lambda)^k e^{-\lambda T}}{k!} \quad (2.13)$$

Donde $\lambda(T)$ es la razón media anual de eventos que ocurren en un tiempo T . A partir de la ecuación anterior, podemos calcular la probabilidad de que no ocurra ningún evento en un periodo de tiempo 0 a T con $k = 0$:

$$P(\text{ningún evento en un tiempo de } 0 \text{ a } T) = P(N(T) = 0) = \frac{(\lambda T)^0 e^{-\lambda T}}{0!} = e^{-\lambda T} \quad (2.14)$$

Entonces la probabilidad de que haya al menos un evento en un periodo de tiempo de 0 a T es:

$$P(\text{al menos 1 evento en un tiempo de } 0 \text{ a } T) = 1 - e^{-\lambda T} \quad (2.15)$$

Por tanto, tenemos que la ecuación (1.2) queda expresada de la siguiente forma:

$$H(y^*; T) = P[Y(x) \geq y^*; t] = 1 - e^{-\lambda T} \quad (2.16)$$

Donde $\lambda(T)_{y^*} = 1/TR$ y TR es el periodo medio de retorno, tiempo en el cual se repetirá un evento.

Recordemos que el peligro sísmico está representado por la función de peligro (H), de acuerdo a la ecuación (1.2):

$$H(y^*; T) = P[Y(x) \geq y^*; t]$$

Donde $[Y(x) \geq y^*; T]$ es la probabilidad de que el parámetro característico de movimiento del suelo, exceda el umbral y^* , al menos una vez durante un tiempo T . $Y(x)$ representa el parámetro del movimiento del suelo en una ubicación x .

Con la ecuación (2.16) pasamos de una curva de razón media anual de excedencia a una curva de probabilidad de excedencia. Esta ecuación la escribimos de la siguiente manera:

$$\{P[Y(x) \geq y^*; t]\} = e^{-\lambda_{y^*} T} \quad (2.17)$$

Finalmente, obtenemos el logaritmo natural de la ecuación anterior y despejamos $\lambda(T)y^*$, que es la razón media anual de veces que el parámetro Y , ha excedido el umbral y^* en la ubicación x .

$$\lambda_{y^*} = -\frac{\ln(1 - P(Y(x) \geq y^*; T))}{T} \quad (2.18)$$

Como el periodo de retorno TR es igual al inverso de λ_{y^*} , entonces:

$$T_R = -\frac{T}{\ln(1 - P(Y(x) \geq y^*; T))} \quad (2.19)$$

el cual corresponde a una probabilidad P de que el parámetro Y se excedió al menos una vez en un tiempo de exposición T .

2.5. Vulnerability Modeller's ToolKit (VMTK)

VMTK es un conjunto de herramientas de código abierto de acceso público, disponible a través de un repositorio en GitHub (<https://github.com/GEMScienceTools/VMTK-Vulnerability-Modellers-ToolKit>).

Está dividido en seis módulos (una explicación más detallada de cada uno de los módulos está disponible en (Martins et al., 2021) :

2.5.1. Modulo de demanda

Este módulo está diseñado para asistir al modelador de vulnerabilidades en la elección de registros de movimiento del suelo apropiados. En la versión actual de VMTK, se presentan tres opciones para la selección y ajuste de estos registros.

La primera alternativa es utilizar todos los registros proporcionados por el usuario. La segunda opción implica el uso de una lista de niveles de intensidad, y en la interfaz gráfica de usuario (GUI) se incluye una lista

predefinida (PGA, SA (0,2 s), SA (0,3 s), SA (0,5 s), SA (0,6 s), SA (1,0 s) o SA (2.0s)). La tercera opción se basa en el método del espectro condicional (CSM).

Es esencial subrayar que el usuario debe elegir un conjunto de registros de movimiento del suelo que satisfaga los requisitos del análisis de vulnerabilidad. En lo que respecta a la lista de intensidades, el modelador puede optar por seleccionar de la lista predefinida, pero también cuenta con la flexibilidad de añadir intensidades personalizadas según sea necesario. En cuanto al CSM, este método implica llevar a cabo una desagregación del riesgo sísmico con el propósito de comprender la distribución de la magnitud, la distancia y el ϵ en una ubicación específica.

2.5.2. Modulo de capacidad

En el VMTK la capacidad de las estructuras se define mediante backbones bilineales, trilineales o cuadrilineales. El módulo de capacidad procesa las curvas de capacidad en el formato de espectro de respuesta de desplazamiento de aceleración (ADRS). Se pueden ingresar las coordenadas de las curvas de capacidad utilizando la interfaz gráfica de usuario (GUI).

2.5.3. Modulo de respuesta estructural

Para calcular la respuesta no lineal de los osciladores de un solo grado de libertad (SDOF), VMTK se integró con el software de modelo de elementos finitos de código abierto *OpenSees* (Mazzoni et al., 2006) a través de su implementación de *Python*. El comportamiento no lineal se introdujo en modelos numéricos a través del *material uniaxial Pinching4* y las curvas de capacidad introducidas previamente por el usuario.

2.5.4. Modulo de fragilidad

El cuarto módulo del VMTK está dedicado a la derivación de funciones de fragilidad. Después de la definición de la relación entre la respuesta estructural y la intensidad del temblor del suelo, las funciones de fragilidad se derivan utilizando el enfoque de análisis de nubes propuesto por (Fatemeh Jalayer et al., 2015).

En este punto, es esencial disponer de un modelo de daño que consta de cuatro estados de daño (DS): Daño leve (DS1), Daño moderado (DS2), Daño extenso (DS3) y Daño completo (DS4). Los umbrales de daño se definen mediante los desplazamientos de fluencia (S_{dy}) y último (S_{du}) de las curvas de capacidad.

2.5.5. Modulo de vulnerabilidad

Para la derivación de funciones de vulnerabilidad, se han implementado dos metodologías en el VMTK. En el primer enfoque, la distribución de probabilidad de la tasa de pérdida se calcula utilizando el modelo de fragilidad resultante y un modelo de daño a pérdida (es decir, la relación entre cada estado de daño y el correspondiente índice de siniestralidad).

La segunda metodología incluida en la herramienta sigue el procedimiento descrito en (Vítor Silva, 2019), en el cual las tasas de pérdida (LR|IM) se calculan directamente a partir de los resultados de los análisis dinámicos no lineales utilizando una relación entre el parámetro de demanda de ingeniería y la tasa de pérdida esperada.

2.5.6. Modulo de comparación y verificación de resultados

Los dos últimos módulos del VMTK brindan la oportunidad de comparar los resultados con otros modelos disponibles, estimar métricas de riesgo que pueden ser comparadas con los resultados de otros modelos o evaluar el riesgo relativo entre diferentes categorías de edificaciones. El GUI cuenta con un conjunto completo de funciones de fragilidad y vulnerabilidad extraídas de la base de datos de vulnerabilidades de GEM. El usuario también puede comparar los resultados de matrices de fragilidad o vulnerabilidad de otros modelos. Además, el conjunto de herramientas permite calcular métricas de riesgo comunes utilizando las funciones de fragilidad o vulnerabilidad resultantes y las curvas de peligro sísmico definidas en el formato de OpenQuake.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1 Peligro sísmico

El procesamiento de los datos se llevó a cabo con el programa EPPS14 (Arce, 2016; Munguia, 2014), el lenguaje se desarrolló en programación de *Matlab*. Este programa tiene la opción para determinar el desagregado de peligro sísmico, considerando fuentes lineales y el cálculo del espectro de peligro uniforme en sitios específicos, los cuales se estarán presentando en este trabajo, como una primera aproximación.

3.1.1. Fuentes Lineales

Las fuentes lineales que representan las fallas o segmentos de fallas en la región con base en la segmentación propuesta por Anderson et al. y a la propuesta por Munguía (Anderson et al., 1989; Munguia, 2014) (Figura 3.1) (Tabla 3.1). Estas corresponden a fallas activas que tienen el potencial de generar sismos con magnitudes importantes, que pudieran generar alguna afectación en estructuras civiles.

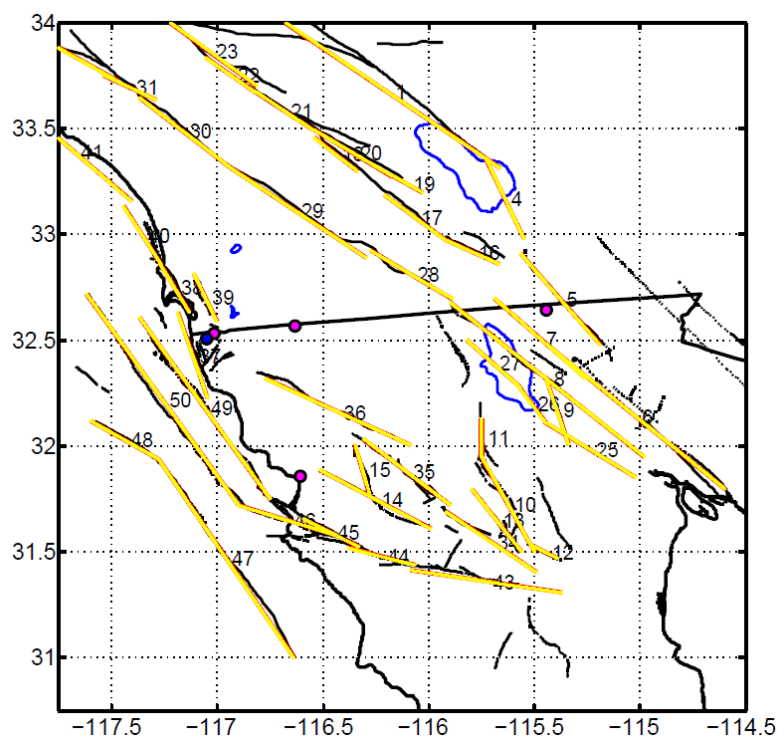


Figura 3.1. Fuentes lineales consideradas en el análisis de peligro sísmico.

Tabla 3.1. Fallas o segmentos de fallas utilizadas en el análisis de peligro sísmico y alguna de sus características (Arce, 2016).

No	Segmento	Coordenadas de los extremos(°)				a	b	M _{max}	Longitud falla (km)
		Longitud	Latitud	Longitud	Latitud				
1	San Andres (Indio)	-116.71	34.03	-115.66	33.31	4.52	0.92	7.3	126
2	San Andres (Palmdale)	-117.97	34.49	-116.71	34.03	4.52	0.92	7.5	127
3	San Andres (1857)	-117.97	34.49	-117.42	34.29	4.52	0.92	8.0	55
4	Brawley	-115.73	33.36	-115.55	32.98	4.18	0.9	6.4	45
5	Imperial (1940)	-115.57	32.91	-115.19	32.48	4.18	0.9	6.8	60
6	Cerro Prieto (1)	-115.44	32.48	-114.60	31.80	4.18	0.9	7.2	110
7	Cerro Prieto (2)	-115.69	32.70	-115.26	32.32	4.18	0.9	7.0	58
8	Cucapah Indiviso	-115.90	32.68	-114.98	31.95	4.08	0.91	7.2	119
9	El Mayor	-115.45	32.33	-115.34	32.01	4.08	0.91	6.5	37
10	Sierra Juárez (1)	-115.75	31.95	-115.50	31.50	4.00	0.98	5.8	55
11	Sierra Juárez (2)	-115.75	32.13	-115.75	31.95	4.00	0.98	5.8	20
12	Sierra Juárez (3)	-115.51	31.53	-115.39	31.47	4.00	0.98	5.8	13
13	Sierra Juárez (4)	-115.80	31.80	-115.56	31.50	4.00	0.98	5.8	40
14	Tres Hermanos (1)	-116.52	31.89	-115.99	31.61	4.45	0.93	5.8	59
15	Tres Hermanos (2)	-116.35	32.01	-116.28	31.77	4.45	0.93	5.8	27
16	San Jacinto (6xSupers.H.)	-115.92	32.98	-115.67	32.86	4.11	0.89	6.4	27
17	San Jacinto (1968)	-116.21	33.19	-115.92	32.98	4.11	0.89	6.5	36
18	San Jacinto (Coyote Mtn.)	-116.55	33.46	-116.34	33.30	4.11	0.89	6.3	26
19	San Jacinto (1954)	-116.18	33.28	-116.03	33.20	4.11	0.89	6.1	16
20	San Jacinto (Clark Valley)	-116.54	33.50	-116.17	33.28	4.11	0.89	6.7	42
21	San Jacinto (Anza)	-116.82	33.68	-116.55	33.49	4.11	0.89	6.6	33
22	San Jacinto (1899)	-117.06	33.84	-116.82	33.67	4.11	0.89	6.5	29
23	San Jacinto (1918)	-117.26	34.03	-116.81	33.70	4.11	0.89	6.2	55
24	San Jacinto (1923)	-117.48	34.23	-117.26	34.03	4.11	0.89	6.5	30
25	Elsinore - Laguna Salada (Sierra Mayor)	-115.45	32.12	-115.02	31.85	4.11	0.89	7.2	50
26	Elsinore - Laguna Salada (Chupamieros 1934)	-115.58	32.29	-115.45	32.11	4.11	0.89	6.7	24
27	Elsinore - Laguna Salada (Laguna Salada 1899)	-115.82	32.50	-115.57	32.28	4.11	0.89	7.5	34
28	Elsinore - Laguna Salada (Coyote Mtn.)	-116.28	32.93	-115.89	32.70	4.11	0.89	7.0	44
29	Elsinore - Laguna Salada (Julian)	-116.97	33.34	-116.30	32.89	4.11	0.89	7.1	80
30	Elsinore - Laguna Salada (Temecula)	-117.37	33.65	-116.96	33.33	4.11	0.89	6.8	52
31	Elsinore - Laguna Salada (Glen Ivy)	-117.54	33.76	-117.29	33.64	4.11	0.89	6.3	27
32	Elsinore - Laguna Salada (Wittier Chino)	-118.24	34.15	-117.47	33.73	4.11	0.89	7.0	85
33	Tr. Ra. Thrusu system (multiple)	-118.25	34.25	-117.39	34.16	4.67	1.17	8.2	80
34	San Miguel - Vallecitos (southern 1956)	-115.92	31.69	-115.49	31.40	4.45	0.93	6.8	52
35	San Miguel - Vallecitos (Central)	-116.31	32.03	-115.90	31.72	4.45	0.93	6.9	52
36	San Miguel - Vallecitos (Northern)	-116.78	32.32	-116.09	32.01	4.45	0.93	5.7	74
37	Rose Canyon Newport - Inglewood (multiple)	-117.19	32.63	-117.05	32.23	4.46	1.16	6.8	47
38	Rose Canyon Newport - Inglewood (Mission Bay)	-117.28	32.87	-117.13	32.63	4.46	1.16	6.4	29
39	Rose Canyon Newport - Inglewood (La Nación)	-117.11	32.82	-117.00	32.59	4.46	1.16	6.5	27
40	Rose Canyon Newport - Inglewood (del Mar)	-117.45	33.14	-117.27	32.86	4.46	1.16	6.6	35
41	Rose Canyon Newport - Inglewood (Pendleton)	-117.95	33.62	-117.41	33.16	4.46	1.16	7.0	72
42	Rose Canyon Newport - Inglewood (1933)	-118.20	33.84	-117.96	33.62	4.46	1.16	6.6	33
43	Agua Blanca - Coronado Bank (Valle de trinidad)	-116.09	31.41	-115.37	31.31	5.15	1.17	5.9	69
44	Agua Blanca - Coronado Bank (Santo Tomas)	-116.38	31.52	-116.07	31.44	5.15	1.17	5.9	32
45	Agua Blanca - Coronado Bank (Punta Banda Rdg.)	-116.59	31.66	-116.33	31.52	5.15	1.17	5.9	29
46	Agua Blanca (Santo Tomas)	-116.90	31.72	-116.44	31.58	5.15	1.17	5.9	46
47	San Clemente (1)	-117.28	31.94	-116.64	31.00	4.46	1.16	5.9	121
48	San Clemente (2)	-117.60	32.12	-117.28	31.94	4.46	1.16	5.9	36
49	Coronado Bank	-117.37	32.61	-116.75	31.75	4.46	1.16	5.5	112
50	San Diego	-117.62	32.72	-116.90	31.72	4.46	1.16	5.5	130
a y b son las variables que describen la recta de la ecuación de Gutenberg y Richter									
M _{max} es la magnitud máxima esperada para cada una de las fuentes sísmicas, considerada en este trabajo.									

3.1.2 Sitios de interés

La región norte de Baja California está sujeta a un elevado peligro sísmico y se caracteriza por su continua actividad sísmica. Como se mencionó en el Capítulo 1, esta región se encuentra en una zona tectónicamente activa debido a su cercanía a la interacción de las placas del Pacífico y Norteamericana(Arce, 2016).

Baja California es el onceavo estado más poblado de México, se encuentra al noroeste del país, Baja California se divide en seis municipios. La zona más poblada es la ciudad fronteriza de Tijuana, donde se

concentra más del 50% de la población estatal. Para el cual los sitios de interés considerados se ubican en la Figura 3.2 y sus características en la Tabla 3.2.



Figura 3.2. Sitios de interés de la ciudad de Tijuana, son ubicaciones de estaciones que conforman la Red Acelerométrica de Tijuana. Estaciones, PR=Presa Abelardo L. Rodríguez, TUN=Tanque Agua de la Tuna, COL= Tanque Cerro Colorado, PLA= Planta de Tratamiento Playas, PCI= Terreno Protección Civil y CCC=Centro Control, Comando y Computo de la Policía.

Tabla 3. 2. Valores del promedio de la velocidad de cortante, en los primeros 30 m del subsuelo (V_{s30}), en los sitios de interés en la ciudad de Tijuana (Acosta et al., 2009).

Sitio	Longitud	Latitud	V_{s30} (m/s)	Asentamiento	Clasificación del suelo según IBC 2006
PR	-116.906667	32.445000	646	Roca Volcánica	C (Very dense soil and soft rock)
TUN	-117.006727	32.480516	487	Arenisca-Conglomerado	C (Very dense soil and soft rock)
COL	-116.878755	32.503136	368	Arenisca-Conglomerado	C (Very dense soil and soft rock)
PCI	-117.054227	32.515075	348	Conglomerado	D (Stiff soil profile)
CCC	-116.992590	32.532390	250	Conglomerado	D (Stiff soil profile)
PLA	-117.122693	32.518990	175	Limolita-Arenisca	E (Soft soil profile)

3.1.3 Distribución de probabilidad de distancia

Las distribuciones se calcularon con el programa EPPS14 para cada uno de los sitios de interés, de acuerdo a lo descrito en la sección 2.4.1 del método de Cornell. Para todas las fuentes se utilizaron 10 intervalos de distancia, desde la distancia más corta a la distancia más larga del sitio a las fuentes.

3.1.4 Distribución de probabilidad de magnitud

Para el cálculo de estas distribuciones se utilizaron los parámetros a y b de la ley de recurrencia sísmica de Gutenberg y Richter obtenidos por (Munguia, 2014). Estos parámetros se estimaron mediante un análisis de la sismicidad de la región norte de Baja California y el sur de California. Las regiones fueron divididas en las 9 zonas sísmicas. La distribución de las probabilidades de magnitud se calculó con el programa EPSS14 de acuerdo a lo descrito en la sección 2.4.2 del método de Cornell. En todos los casos se utilizaron 10 intervalos de magnitud, que van desde la magnitud mínima (4.5) hasta la magnitud máxima esperada en cada zona, determinada en la revisión bibliográfica llevada a cabo o de los catálogos de sismicidad consultados (Tabla 3.1).

3.1.5. Desagregado de peligro sísmico para la estación PCI

Con el uso del programa EPPS14 se obtuvo el desagregado de peligro sísmico para la estación PCI detallada en la sección 3.1.2. En la Figura 3.3 se muestran las curvas de peligro sísmico, de la cual podemos determinar la aceleración con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años correspondiente al valor de PGA de 0.34, para un periodo natural de vibrar de la estructura de $T=0$ y un amortiguamiento del 5%, el cual es prescrito en la mayoría de los reglamentos de construcción, ya que es representativo para la mayoría de las estructuras.

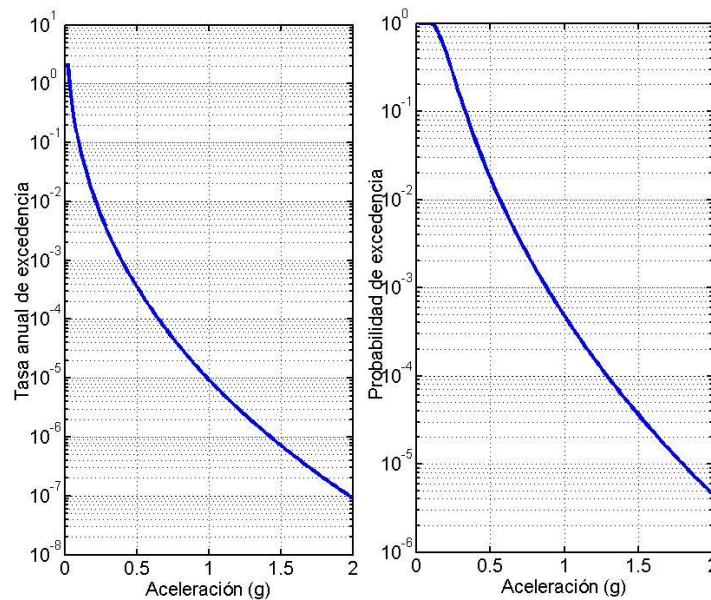


Figura 3.3. Curvas de peligro sísmico de aceleración espectral, para la estación PCI ubicada en Tijuana. a) Tasa anual de excedencia del parámetro de aceleración espectral. b) Probabilidad de excedencia de la aceleración espectral.

En las curvas anteriores se muestra la contribución total de cada una de las fuentes consideradas. Sin embargo, en la Figura 3.4, el peligro sísmico se muestra de una manera más clara. En esta figura se observa la contribución al peligro en el sitio de interés por cada uno de los segmentos de falla considerados. La probabilidad de excedencia de 0.3 g es 13.83% en 50 años.

Es de interés notar que las fallas más alejadas del sitio en estudio no contribuyen al peligro aun cuando éstas pudieran generar sismos fuertes. Esto es una consecuencia de las distancias grandes entre el sitio y las posibles fuentes. Por otro lado, la figura muestra que fallas cercanas, pero con ocurrencia de sismos de magnitud baja, tampoco contribuyen de manera significativa al peligro sísmico en el sitio.

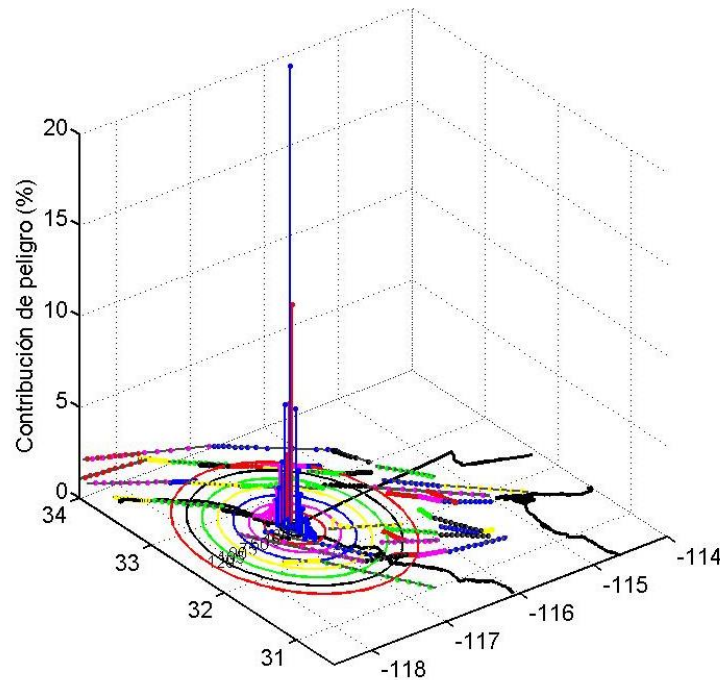


Figura 3.4. Desagregado de peligro sísmico en el sitio de la estación PCI. Las líneas verticales representan la contribución al peligro de cada uno de los segmentos de falla considerados. Mientras más larga sea la longitud de estas líneas, mayor es la contribución al peligro.

En la Figura 3.4 anterior, se puede observar que la mayor contribución al peligro sísmico está dada por el segmento de falla 37, el cual corresponde al segmento multiple del sistema de fallas *Rose Canyon Newport - Inglewood*. Las fallas *Coronado Banks* y *San Diego* a pesar de estar a una corta distancia al punto de observación no contribuyen significativamente al peligro sísmico (Arce, 2016). Lo anterior debido a que la máxima magnitud considerada para esas fallas es de 5.5, mientras que para la falla *Rose Canyon Newport - Inglewood* se consideró una magnitud máxima de 6.8.

En la Figura 3.5 se presenta la contribución al peligro sísmico en forma de histograma en tres dimensiones. Uno de los ejes horizontales muestra intervalos de magnitud mientras que el otro muestra intervalos de distancia. La figura, aunque indica que la mayor contribución al peligro proviene de sismos con magnitudes de entre 5 y 6.5, localizados a distancias de entre 0 y 30 km del sitio, no proporciona información acerca de la ubicación geográfica de esos sismos. Sin embargo, es claro que esta información sí es proporcionada en la Figura 3.4. Los resultados mostrados en ambas figuras son congruentes entre sí.

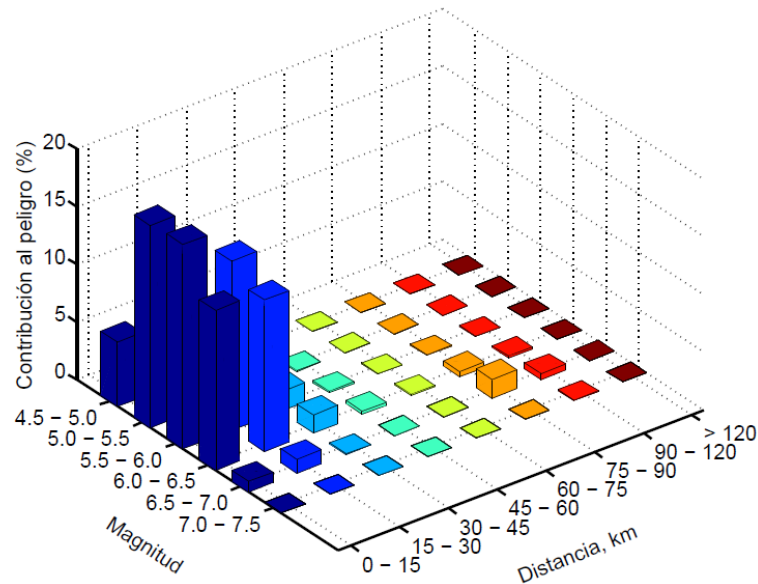


Figura 3.5. Contribución al peligro sísmico total de todos los segmentos de falla considerados.

De la misma manera en la que se obtuvo el desagregado de peligro sísmico en la sección 3.1.5, se realizó para cada sitio de interés, se presenta el resumen de cada uno de los resultados en la Tabla 3.3, estos datos serán de utilidad para poder seleccionar un sismo de diseño apropiado para cada lugar.

Tabla 3.3. Valores del desagregado de peligro sísmico para cada sitio de interés.

Sitio	Falla de mayor contribución	PGA	Probabilidad de excedencia en 50 años (%)	Intervalo de magnitud	Intervalo de distancia (km)
PR	Falla San Miguel Vallecitos (Northern) 36	0.20	1.47	5.0-7.0	15-30
TUN	Falla Rose Canyon Newport Inglewood (múltiple) 37	0.26	5.35	5.5-7.0	15-30
COL	Falla San Miguel Vallecitos (Northern) 36	0.26	4.08	5.0-6.5	15-30
PCI	Falla Rose Canyon Newport Inglewood (múltiple) 37	0.34	13.83	5.0-6.5	0-15
CCC	Falla Rose Canyon Newport Inglewood (La Nación) 39	0.38	21.79	4.5-6.5	0-15
PLA	Falla Rose Canyon Newport Inglewood (múltiple) 37	0.54	60.87	4.5-6.5	0-30

3.1.6. Espectro de peligro uniforme para la estación PCI

El procedimiento para calcular el espectro de peligro uniforme es el siguiente. Primero se calculan curvas de peligro sísmico, de aceleración espectral, para distintos periodos fundamentales de vibración y un mismo

amortiguamiento. Después, de cada una de las curvas de peligro sísmico generadas para los distintos periodos, se extrae el valor de aceleración con una misma probabilidad de ser excedida en un cierto intervalo de tiempo (por ejemplo, la aceleración con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años). Finalmente, los valores de aceleración se grafican en función de los periodos fundamentales correspondientes (Figura 3.6). Este tipo de espectro, cuyos niveles de aceleración tienen la misma probabilidad de ser excedidas, es de utilidad en ingeniería sísmica para la selección de sismogramas de diseño (Munguia, 2014)(Arce, 2016).

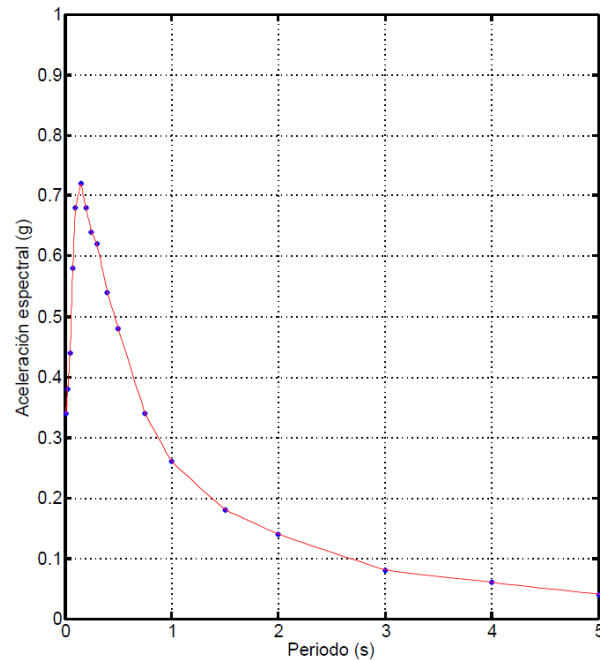


Figura 3.6. Espectro de aceleración de peligro sísmico uniforme para el sitio donde se ubica la estación PCI.

3.1.7. Selección del registro de diseño para la Estación PCI

Una vez calculado el espectro de aceleración de peligro sísmico uniforme, se buscaron registros que tuvieran las características determinadas a partir del desagregado de peligro del sitio (Tabla 3.4). La búsqueda se realizó en las bases de datos del *Center for Engineering Strong Motion* (CESMD) y en la Red de Acelerógrafos del Noroeste de México (RANM). Las características buscadas fueron: sismos con magnitudes entre 5.0 y 6.5, registrado en conglomerado y a distancias epicentrales de entre 0 y 15 km y con aceleración pico de ≈ 0.34 g. Se encontraron algunos registros que cumplieran con estas características, se muestran en la Tabla 3.4. Para cada uno de estos registros se calculó su espectro de respuesta y se comparó con el espectro de peligro sísmico uniforme calculado (Figura 3.7).

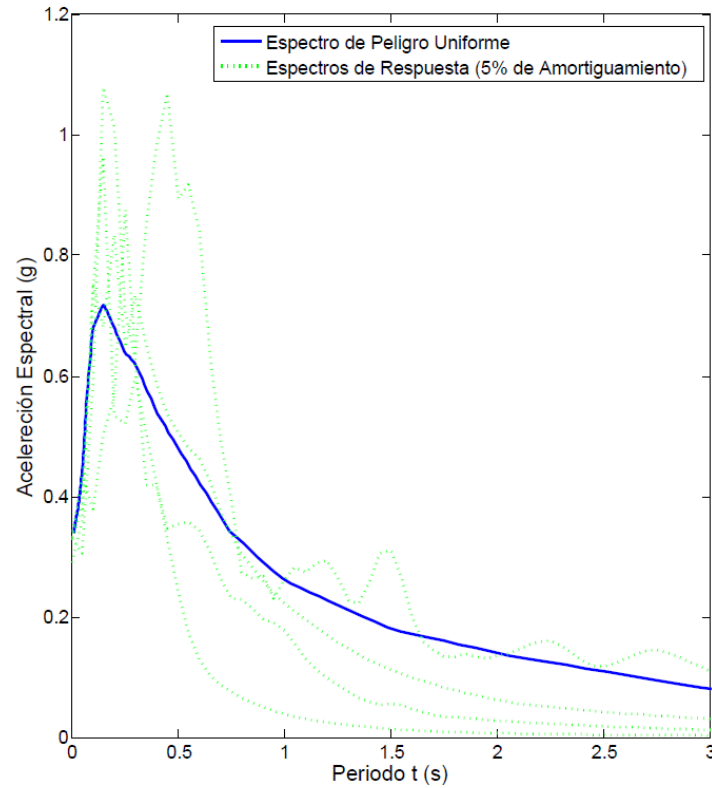


Figura 3.7. Espectro de respuesta de los registros de la tabla 3.4 comparados con el espectro de peligro sísmico uniforme para el sitio donde se ubica la estación PCI.

Tabla 3.4. Registros CESDM considerados en la estación PCI para perfil de suelo tipo D de ambientes tectónicos similares.

Id	Estación	Sismo	Fecha	Magnitud	d(km)	PGA (g)	V_{s30}
acel1_PCI	14125	<i>Inglewood</i>	17/mayo/2009	4.7Mw	21.8	0.301	334
acel2_PCI	SRT	<i>Searles Valley</i>	05/julio/2019	5.0Mw	18.2	0.314	301
acel3_PCI	13881	<i>La Habra</i>	28/marzo/2014	5.1 Mw	3.6	0.331	332
acel4_PCI	23056	<i>Chino Hills</i>	29/julio/2008	5.4 Mw	17.0	0.327	346
acel5_PCI	36176	<i>Parkfield</i>	28/septiembre/2004	6.0 Ml	18.8	0.328	309

El procedimiento con el que se obtuvo la Tabla 3.4, se realizó para cada sitio de interés, y se presenta el resumen de cada uno de los resultados de la Tabla 3.5 a la Tabla 3.10, estos datos serán de utilidad para poder realizar el análisis de historia de tiempo no línea y definir la relación entre la respuesta estructural y la intensidad del temblor del suelo

Tabla 3.5. Registros CESDM considerados en la estación CCC para perfil de suelo tipo D de ambientes tectónicos similares.

Id	Estación	Sismo	Fecha	Magnitud	d(km)	PGA (g)	V _{s30}
acel1_ CCC	13879	<i>La Habra</i>	28/marzo/2014	5.1 Mw	8.3	0.307	283
acel2_ CCC	36138	<i>Parkfield</i>	28/septiembre/2004	6.0 Ml	10.7	0.308	270
acel3_ CCC	68150 (Chn 1)	<i>South Napa</i>	24/agosto/2014	6.0 Mw	6.4	0.339	300
acel4_ CCC	68150 (Chn 3)	<i>South Napa</i>	24/agosto/2014	6.0 Mw	6.4	0.370	300
acel5_ CCC	57191	<i>MorganHill84</i>	24/abril/1984	6.2 Ml	3.9	0.314	282
acel6_ CCC	24643	<i>Northridge</i>	17/enero/1994	6.4 Ml	20.1	0.320	258

Tabla 3.6. Registros CESDM considerados en la estación PLA para perfil de suelo tipo D y E de ambientes tectónicos similares.

Id	Estación	Sismo	Fecha	Magnitud	d(km)	PGA (g)	V _{s30}
acel1_PLA	36431	<i>Parkfield</i>	20/diciembre/1994	4.9 Mw	7.5	0.433	297 (D)
acel2_ PLA	WMD	<i>Westmorland</i>	30/septiembre/2020	4.9 Mw	2.1	0.538	301 (D)
acel3_ PLA	11369	<i>Westmorland</i>	27/abril/1981	5.7Mw	6.9	0.480	194 (D)
acel4_ PLA	36228	<i>Parkfield</i>	28/septiembre/2004	6.0 Ml	11.9	0.600	173 (E)
acel5_ PLA	36410	<i>Parkfield</i>	28/septiembre/2004	6.0 Ml	12.3	0.570	231 (D)
acel6_ PLA	24386	<i>Northridge</i>	17/enero/1994	6.4 Ml	6.6	0.450	284 (D)

Tabla 3.7. Registros CESDM considerados en la estación COL para perfil de suelo tipo C y D de ambientes tectónicos similares.

Id	Estación	Sismo	Fecha	Magnitud	d(km)	PGA (g)	V _{s30}
acel1_COL	14125	<i>Inglewood</i>	17/mayo/2009	4.7 Mw	21.8	0.290	334 (D)
acel2_ COL	57187	<i>Livemore80B</i>	26/enero/1980	5.8 Ml	20.4	0.280	378 (C/D)
acel3_ COL	36445	<i>Parkfield</i>	28/septiembre/2004	6.0 Ml	15.2	0.141	308 (D)
acel4_ COL	24283	<i>Northridge</i>	17/enero/1994	6.4 Ml	32.5	0.290	342 (D)
acel5_ COL	24592	<i>Northridge</i>	17/enero/1994	6.4 Ml	38.2	0.260	365 (C/D)

Tabla 3.8. Registros CESDM considerados en la estación TUN para perfil de suelo tipo C de ambientes tectónicos similares.

Id	Estación	Sismo	Fecha	Magnitud	d(km)	PGA (g)	V _{s30}
acel1_TUN	13068	<i>Chino Hills</i>	29/julio/2008	5.4 Mw	10.4	0.270	485 (C)
acel2_TUN	13873	<i>Chino Hills</i>	29/julio/2008	5.4 Mw	12.4	0.260	396 (C)
acel3_TUN	CCC	<i>Searles Valley</i>	3/junio/2020	5.5 Mw	11.5	0.260	432 (C)
acel4_TUN	89101	<i>Petrolia</i>	22/junio/2019	5.6 Mw	5.8	0.300	422 (C)
acel5_TUN	KCO	<i>Petrolia</i>	22/junio/2019	5.6 Mw	3.8	0.270	--
acel6_TUN	12204	<i>PalmSprings86</i>	08/julio/1986	6.0 Mw	33.7	0.240	447 (C)
acel7_TUN	36520 (Chn 1)	<i>Parkfield</i>	28/septiembre/2004	6.0 Ml	7.7	0.290	467 (C)
acel8_TUN	36520 (Chn 3)	<i>Parkfield</i>	28/septiembre/2004	6.0 Ml	7.7	0.290	467 (C)
acel9_TUN	24464	<i>Northridge</i>	17/enero/1994	6.4 Ml	18.5	0.320	464 (C)

Tabla 3.9. Registros CESDM considerados en la estación PR para perfil de suelo tipo B y C de ambientes tectónicos similares.

Id	Estación	Sismo	Fecha	Magnitud	d(km)	PGA (g)	V _{s30}
acel1_PR	57217	<i>CoyoteLake</i>	6/agosto/1979	5.7 Ml	2.1	0.250	561 (C)
acel2_PR	36437 (Chn 1)	<i>Parkfield</i>	28/septiembre/2004	6.0 Ml	9.5	0.192	565 (C)
acel3_PR	36437 (Chn 3)	<i>Parkfield</i>	28/septiembre/2004	6.0 Ml	9.5	0.199	565 (C)
acel4_PR	54171 (Chn 1)	<i>ChalfantValley</i>	21/julio/1986	6.4 Ml	21	0.170	522 (C)
acel5_PR	54171 (Chn 3)	<i>ChalfantValley</i>	21/julio/1986	6.4 Ml	21	0.250	522 (C)
acel6_PR	57562	<i>Loma Prieta</i>	17/octubre/1989	6.9 Mh	20.5	0.160	648 (C)
acel7_PR	57563 (Chn 1)	<i>Loma Prieta</i>	17/octubre/1989	6.9 Mh	20.3	0.270	648 (C)
acel8_PR	57563 (Chn 3)	<i>Loma Prieta</i>	17/octubre/1989	6.9 Mh	20.3	0.230	648 (C)
acel9_PR	CLC	<i>Ridgecrest</i>	4/julio/2019	6.4 Mw	14.8	0.192	1464 (B)

Tabla 3.10. Registros RANM considerados en ambientes tectónicos similares.

Id	Estación	Fecha	Magnitud	d(km)	PGA (g)	V _{s30}
AGX1_00	Aguascalientes	19/noviembre/2018	4.9 Ml	11.8	0.360	188 (D)
AGX1_90	Aguascalientes	19/noviembre/2018	4.9 Ml	11.8	0.267	188 (D)
CHI1_00	Chihuahua	9/febrero/2008	5.5 Ml	10.3	0.221	181 (D)
CHI1_90	Chihuahua	9/febrero/2008	5.5 Ml	10.3	0.299	181 (D)
CHI2_00	Chihuahua	11/febrero/2008	5.1 Ml	11.2	0.389	181 (D)
CHI2_90	Chihuahua	11/febrero/2008	5.1 Ml	11.2	0.488	181 (D)
CHI3_00	Chihuahua	4/abril/2010	7.2 Mw	20.32	0.389	181 (D)
CHI3_90	Chihuahua	4/abril/2010	7.2 Mw	20.32	0.249	181 (D)
GEO1_00	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	22/febrero/2002	5.8 Ml	7.46	0.403	205 (D)
GEO1_90	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	22/febrero/2002	5.8 Ml	7.46	0.238	205 (D)
GEO2_00	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	13/enero/2003	5.2 Ml	6.2	0.220	205 (D)
GEO2_90	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	13/enero/2003	5.2 Ml	6.2	0.192	205 (D)

GEO3_00	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	22/agosto/2004	5.1 MI	2.29	0.360	205 (D)
GEO3_90	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	22/agosto/2004	5.1 MI	2.29	0.267	205 (D)
GEO4_00	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	24/mayo/2006	5.4 Mw	3.75	0.430	205 (D)
GEO4_90	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	24/mayo/2006	5.4 Mw	3.75	0.366	205 (D)
GEO5_00	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	19/septiembre/2009	5.3 MI	3.02	0.316	205 (D)
GEO5_90	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	19/septiembre/2009	5.3 MI	3.02	0.342	205 (D)
GEO6_00	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	30/diciembre/2009	6.0 MI	7.93	0.216	205 (D)
GEO6_90	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	30/diciembre/2009	6.0 MI	7.93	0.178	205 (D)
GEO7_00	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	4/abril/2010	7.2 Mw	12.27	0.286	205 (D)
GEO7_90	Planta Geotérmica de Cerro Prieto	4/abril/2010	7.2 Mw	12.27	0.288	205 (D)
TAM1_00	Tamaulipas	9/febrero/2008	5.5 MI	13.83	0.258	217 (D)
TAM1_90	Tamaulipas	9/febrero/2008	5.5 MI	13.83	0.279	217 (D)
TAM2_00	Tamaulipas	12/febrero/2008	5.2 MI	15.33	0.442	217 (D)
TAM2_90	Tamaulipas	12/febrero/2008	5.2 MI	15.33	0.390	217 (D)
TAM3_00	Tamaulipas	19/febrero/2008	5.0 MI	14.57	0.320	217 (D)
TAM3_90	Tamaulipas	19/febrero/2008	5.0 MI	14.57	0.278	217 (D)
VCP1_00	Volcán Cerro Prieto	22/febrero/2002	5.8 MI	7.81	1.003	437 (C)
VCP1_90	Volcán Cerro Prieto	22/febrero/2002	5.8 MI	7.81	1.003	437 (C)

3.2 Fragilidad y vulnerabilidad sísmica

Para la obtención de las funciones de fragilidad y vulnerabilidad de viviendas de mampostería en la ciudad de Tijuana, Baja California se siguió el flujo de trabajo de la metodología VMTK, a través de los siguientes módulos:

3.2.1. Selección de registros de movimientos de suelo

Con lo realizado en la sección 3.1, se determinó el desagregado de peligro sísmico, considerando fuentes lineales y el cálculo del espectro de peligro uniforme en sitios específicos y los resultados se utilizaron para la selección de registros de acuerdo con el entorno tectónico, la magnitud y la distancia (Ver Tabla 3.3 en la sección 3.1). La demanda sísmica solicitada por VMTK se integró por medio de los registros de acelerogramas obtenidos de las siguientes bases de datos de movimiento del suelo: *Center for Engineering Strong Motion* (CESMD) y en la Red de Acelerógrafos del Noroeste de México (RANM) (Figura 3.8) (ver Tablas 3.4 a 3.10 en la sección 3.1).

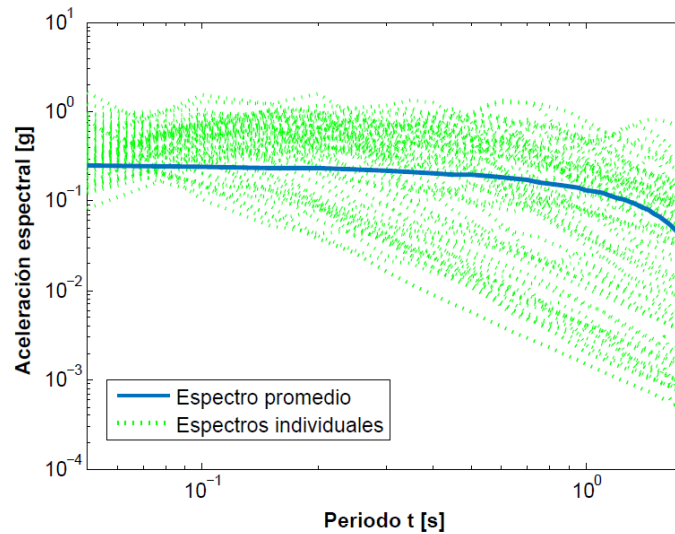


Figura 3.8. Espectros de respuesta para registros de movimientos de suelo seleccionados para la ciudad de Tijuana.

3.2.2. Curvas de capacidad

En el capítulo 2 se definió la clasificación de las viviendas de mampostería más comunes en la ciudad de Tijuana. Al ser una ciudad fronteriza con Estados Unidos, se buscaron tipologías con curvas de capacidad y con características similares en el manual de HAZUS (FEMA, 2012), siendo el de mayor similitud la tipología RM2/L y RM2/M que corresponde a muros de carga de mampostería reforzada con diafragmas de concreto de baja (1-3 pisos) y mediana altura (4-7 pisos), respectivamente. Estos muros son los elementos verticales en el sistema resistente a fuerzas laterales (LWAL) (ver tabla 3.11). Cada curva de capacidad para edificaciones de HAZUS es una gráfica de desplazamiento espectral y aceleración espectral para facilitar la comparación directa con la demanda del sismo, convertida a partir de una curva de la resistencia de carga lateral de un edificio en función de un desplazamiento lateral característico.

Tabla 3.11. Comparación de clasificación de viviendas de mampostería de la ciudad de Tijuana y Manual de HAZUS.

Clasificación de vivienda en Tijuana		Clasificación de vivienda en HAZUS	
Taxonomía	Descripción Tipología	Taxonomía ⁽¹⁾	Descripción Tipología
MCF/LWAL/DUC/H:1-3	Mampostería confinada, dúctil de 1-3pisos	RM2/LWAL/L(H:1-3)	Mampostería reforzada de ladrillo o bloque de 1-3 pisos
MCF/LWAL/DNO/H:1-3	Mampostería confinada, no dúctil de 1-3pisos		
MR/LWAL/DUC/H:1-3	Mampostería reforzada, dúctil de 1-3pisos		
MR/LWAL/DNO/H:1-3	Mampostería reforzada, no dúctil de 1-3pisos		
MCF/LWAL/DUC/H:4-5	Mampostería confinada, dúctil de 4-5pisos	RM2/LWAL/M(H:4-7)	Mampostería reforzada de ladrillo o bloque de 4-7 pisos
MCF/LWAL/DNO/H:4-5	Mampostería confinada, no dúctil de 4-5pisos		

MR/LWAL/DUC/H:4-5	Mampostería reforzada, dúctil de 4-5pisos		
MR/LWAL/DNO/H:4-5	Mampostería reforzada, no dúctil de 4-5pisos		

⁽¹⁾RM2: Mampostería reforzada con diafragmas de concreto, LWAL: Muros verticales en el sistema resistente a fuerzas laterales, L: Baja Altura, M; Mediana Altura H: Número de pisos.

Las curvas de capacidad definidas por HAZUS están dadas por el punto de fluencia (D_y , A_y) y el punto de capacidad máxima (D_u , A_u) que se muestran en la Figura 3.9. La capacidad de fluencia representa la verdadera resistencia lateral del edificio considerando las redundancias en el diseño, el conservadurismo en los requisitos del código y la resistencia real de los materiales. La capacidad máxima representa la resistencia máxima del edificio cuando el sistema estructural global ha alcanzado un estado completamente plástico. El manual de HAZUS muestra solamente el valor de estos dos puntos para cada tipología estructural, así que utilizando un polinomio de cuarto grado las curvas se rehicieron asegurándose con cumplir los siguientes requisitos: (1) la curva pasa por el punto de fluencia (D_y , A_y), (2) la curva pasa por el punto de capacidad máxima (D_u , A_u), (3) la curva es lineal desde el origen hasta el punto de fluencia, (4) la curva conserva la pendiente inicial en el punto de fluencia, y (5) la curva es horizontal en el punto de capacidad máxima (Lopez et al., 2001).

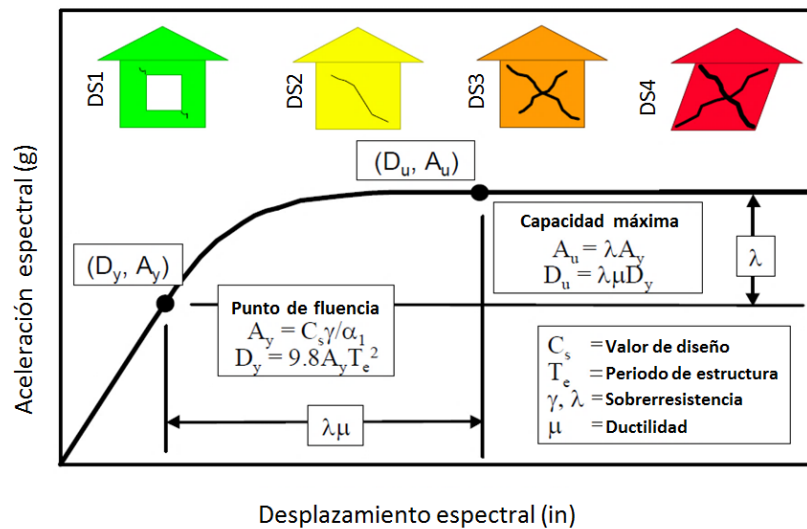


Figura 3.9. Ejemplo curva de capacidad de edificación del manual HAZUS y puntos de control (D_y , A_y) y (D_u , A_u), (FEMA, 2015).

Se transformó la curva de capacidad a una curva de capacidad bilineal, esto para obtener una representación idealizada, se siguió el procedimiento ATC-40 (ATC-40, 1996), en donde se define un punto de fluencia A de coordenadas (d_y , a_y) y un punto de desempeño supuesto B de coordenadas (D_u , A_u) y el área designada como A1 aproximadamente igual al área designada como A2 (Vargas et al., 2014), como se muestra en la Figura 3.10.

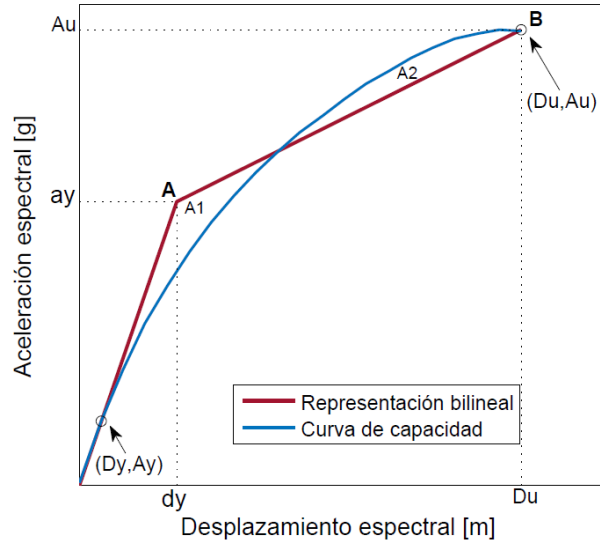


Figura 3.10. Representación bilineal de la curva de capacidad (Medina & Music, 2018).

La Figura 3.11 muestra la curva de capacidad HAZUS bilineales idealizadas para edificios con muros de carga de mampostería reforzada de baja altura (RM2L) y media altura (RM2M), con un nivel de código de diseño sísmico bajo (L), moderado (M) y alto (H).

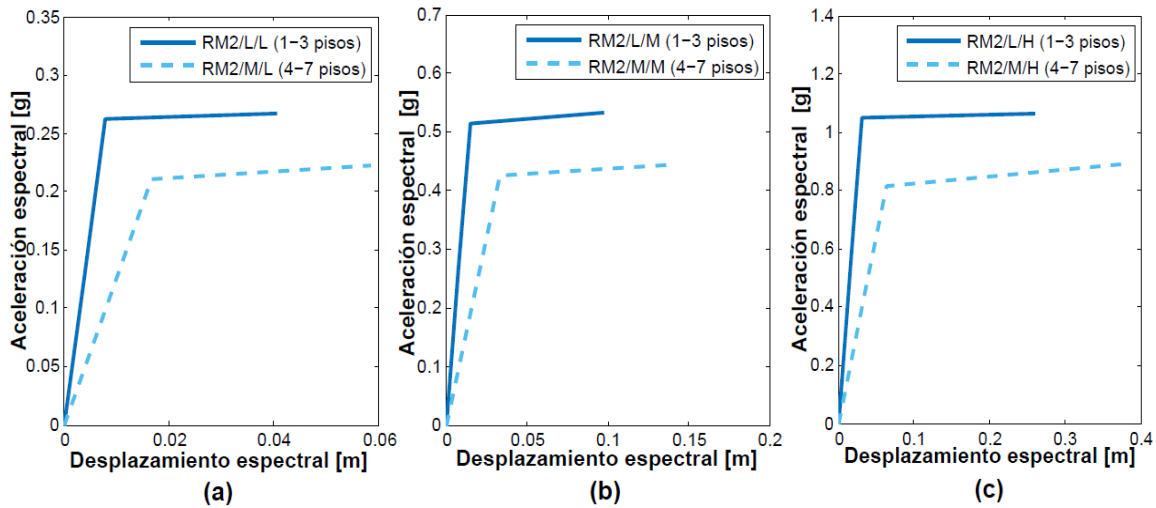


Figura 3.11. Curvas de capacidad bilineales para viviendas de mampostería de baja altura (RM2/L) y mediana altura (RM2/M). (a) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) Nivel de diseño sísmico alto.

3.2.3. Respuesta estructural

La evaluación del análisis de historia de tiempo no lineal realizados bajo el criterio de osciladores de un solo grado de libertad (SDOF), realizado por clase de edificio a través de VMTK (Martins et al., 2021), *OpenSees* (Mazzoni et al., 2006), vinculado por medio de lenguaje *Python*. El comportamiento no lineal se introdujo en modelos numéricos a través del *material uniaxial Pinching4* y en función de la curva de capacidad asociada, expresada en términos de aceleración espectral (S_a), versus desplazamiento espectral (S_d).

Después de realizar los análisis estructurales, con VMTK se produce una distribución de los parámetros de demanda de ingeniería (EDP) frente a los niveles de medida de intensidad (IM), que luego se utilizan para la derivación de las funciones de fragilidad. Se definieron cuatro tipos de IM como representativos de las características dinámicas de las clases de edificios: aceleración máxima del suelo (PGA) y SA ($T=0.3$ s) para viviendas de uno a tres pisos (Figura 3.12), y aceleración espectral SA ($T=0.5$ s y $T=0.6$ s) para viviendas con cuatro o más pisos (Figura 3.13). Se definió 0.30 s, 0.50 s y 0.60 s, con base en el período alargado, para tener en cuenta el efecto del daño estructural en las propiedades dinámicas del inventario de viviendas (Acevedo et al., 2017).

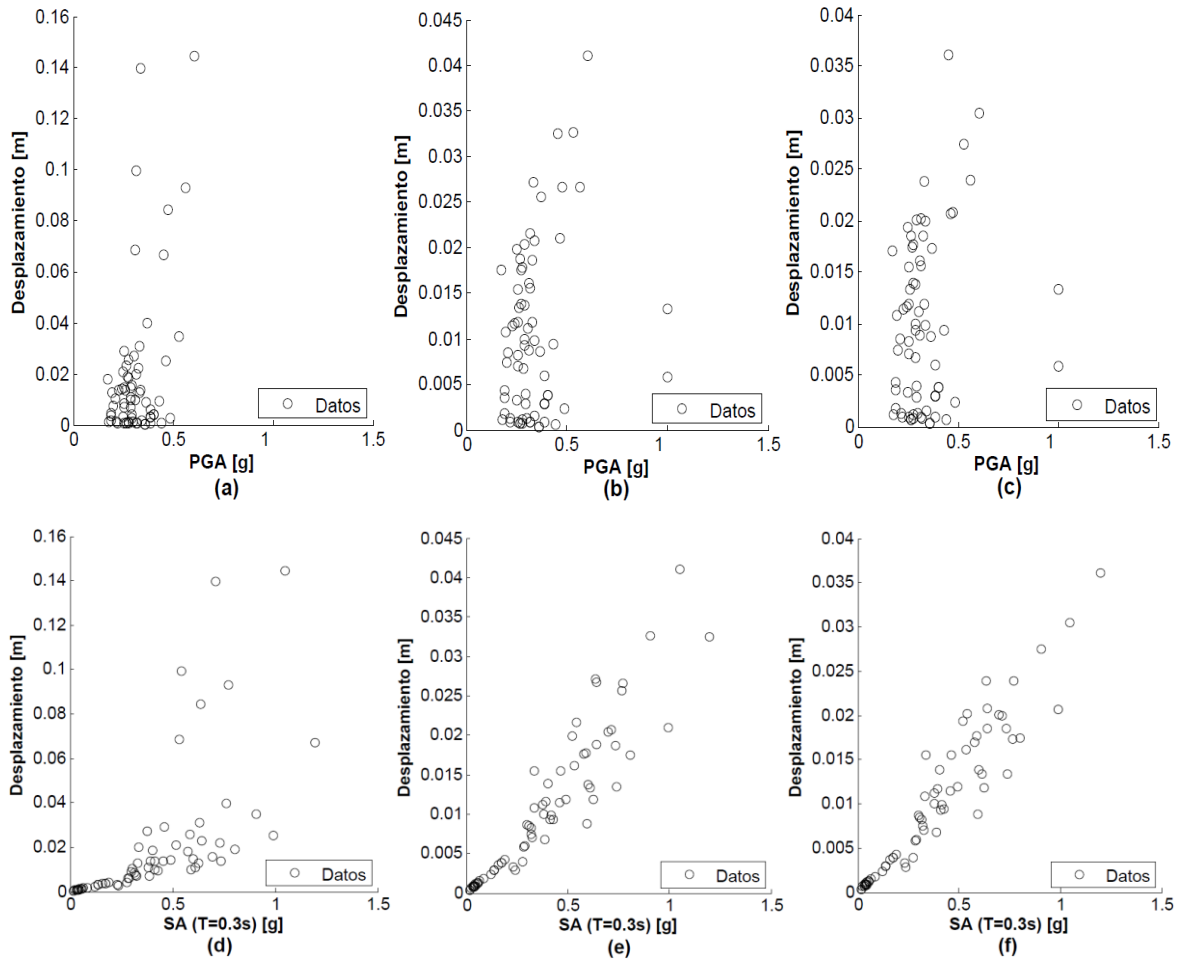


Figura 3.12. Distribuciones EDP vs IML, para viviendas de mampostería de baja altura RM2/L (1 a 3 Pisos). (a) y (d) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) y (e) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) y (f) Nivel de diseño sísmico alto.

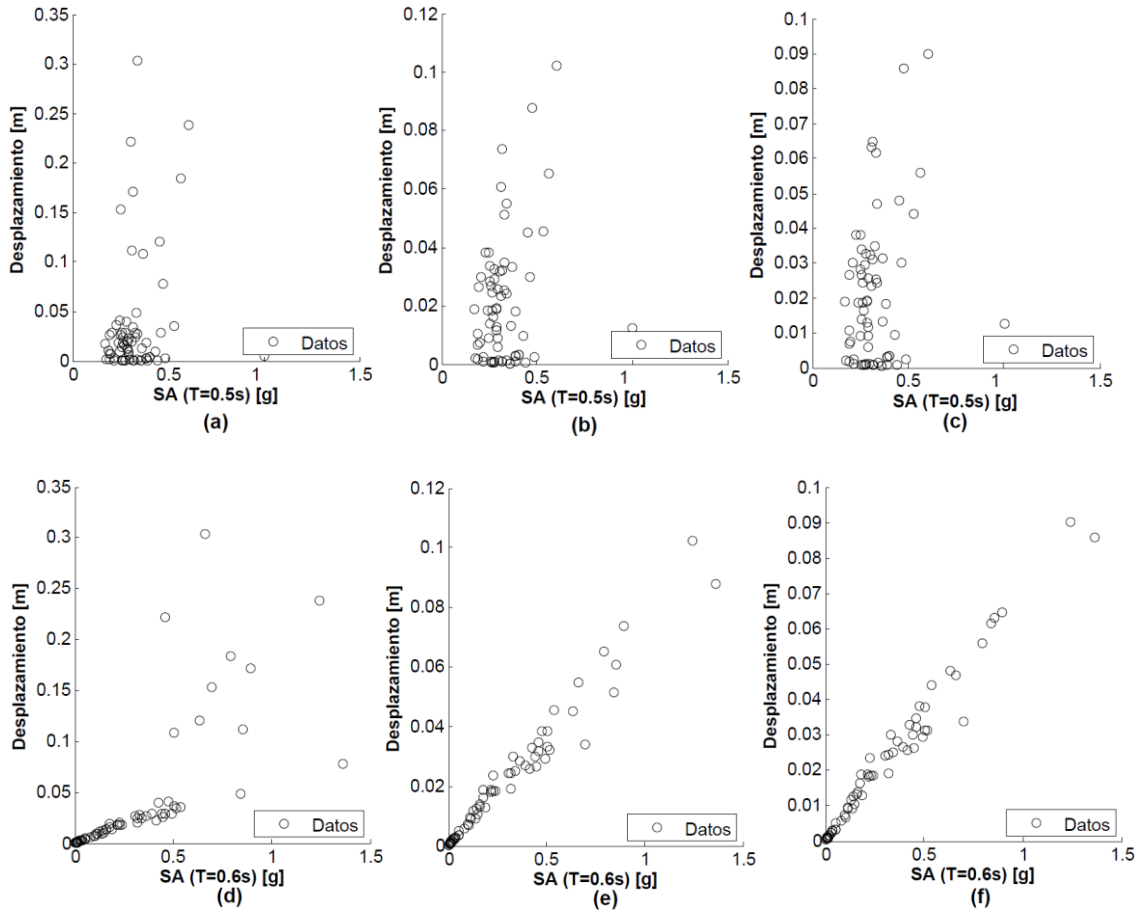


Figura 3.13. Distribuciones EDP vs IML, para viviendas de mampostería de mediana altura RM2/M (4 a 7 Pisos). (a) y (d) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) y (e) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) y (f) Nivel de diseño sísmico alto.

3.2.4. Definición de criterios de daño

Se han considerado cuatro posibles estados de daño que van desde leve (DS1), moderado (DS2), extenso (DS3) y completo (DS4). Este estudio sigue de cerca la propuesta de (Lagomarsino & Giovinazzi, 2006), con excepción del segundo estado de daño (daño moderado), el cual se ha definido de acuerdo a (Villar-Vega et al., 2017). En la propuesta original, se produce un daño leve cuando el 70% del espectro excede el desplazamiento en el punto de fluencia (es decir, $0.70 S_{dy}$) y el daño moderado cuando se supera el 150% del mismo desplazamiento (es decir, $1.5 S_{dy}$). El umbral para daños extensos se define como la media entre el desplazamiento espectral de fluencia y final (es decir, $(S_{dy} + S_{du}) / 2$), y el completo cuando se excede el desplazamiento final (es decir, S_{du}). Sin embargo, para estructuras de mampostería con ductilidad reducida, la formulación para estados límite moderado y extenso puede conducir a un umbral de daño moderado que es más alto que el de daño extenso. Por esta razón, el umbral de daño moderado se ha definido como $0.75 S_{dy} + 0.25 S_{du}$ (Villar-Vega et al., 2017). El criterio de daño utilizado aquí se resume en la figura 3.14.

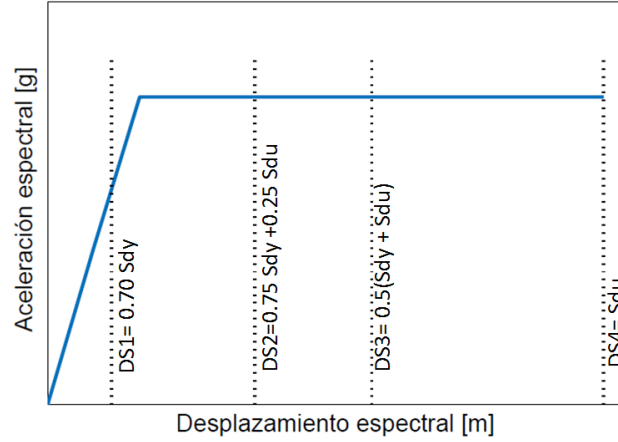


Figura 3.14. Modelo de criterios daños (Villar-Vega et al., 2017).

3.2.5. Derivación de funciones de fragilidad

Después de la definición de la relación entre la respuesta estructural y la intensidad del temblor del suelo, las funciones de fragilidad se derivan utilizando el enfoque de *análisis de cloud* propuesto por (Fateme Jalayer et al., 2015). Esta metodología requiere la definición de una curva de mejor ajuste entre una medida de intensidad (IM) y un parámetro de demanda de ingeniería (EDP) en el espacio logarítmico.

Se ha implementado el algoritmos de regresión en el kit de herramientas, donde los desplazamientos considerados excesivamente altos se tratan de manera diferente mediante un análisis de regresión censurado (Stafford, 2008). Este método de regresión radica en el hecho de que en los análisis numéricos se puede lograr la convergencia para niveles de desplazamiento que son incompatibles con la estabilidad estructural. Esto ocurre principalmente debido a limitaciones en el modelado numérico y puede introducir sesgos en la curva de mejor ajuste. El análisis de regresión censurado requiere la definición de un umbral (es decir, desplazamiento máximo o aceleración), después del cual se supone que los puntos de datos se ven afectados por errores numéricos. Este umbral se define mediante un factor de censura definido como la relación entre el EDP máximo admisible y el umbral para el último estado de daño considerado (por ejemplo, daño completo). Para este caso, un factor de censura igual a 1.5 fue utilizado y significa que los EDP 1.5 veces por encima del umbral del último estado de daño se tratarán de forma diferente (Martins et al., 2021; Martins & Silva, 2020).

Al no tener en cuenta explícitamente la variabilidad de edificio a edificio (es decir, solo se ha proporcionado una curva de capacidad por clase de edificio), es posible aumentar la incertidumbre para tener en cuenta esta fuente de variabilidad. En VMTK se realiza este ajuste agregando a la dispersión de la variabilidad de registro a registro ($\sigma_{rec-to-rec}$) (Martins et al., 2021). En otras palabras dos registros con el mismo IM exacto pueden dar lugar a respuestas estructurales distintas, la contribución de la variabilidad de edificio a edificio ($\sigma_{bld-to-bld}$). Por simplicidad hemos decidido aumentar directamente la desviación estándar alrededor de la curva de mejor ajuste en un factor de 0.30 como se describe en la ecuación 3.1 (Martins & Silva, 2020).

$$\sigma_{total} = \sqrt{(\sigma_{rec-to-rec})^2 + (\sigma_{bld-to-bld})^2} \quad (3.1)$$

Las funciones de fragilidad resultantes se definen utilizando funciones logarítmicas normales acumulativas, como se presenta en la Figura 3.15 y Figura 3.16 para las clases de construcción descritas anteriormente.

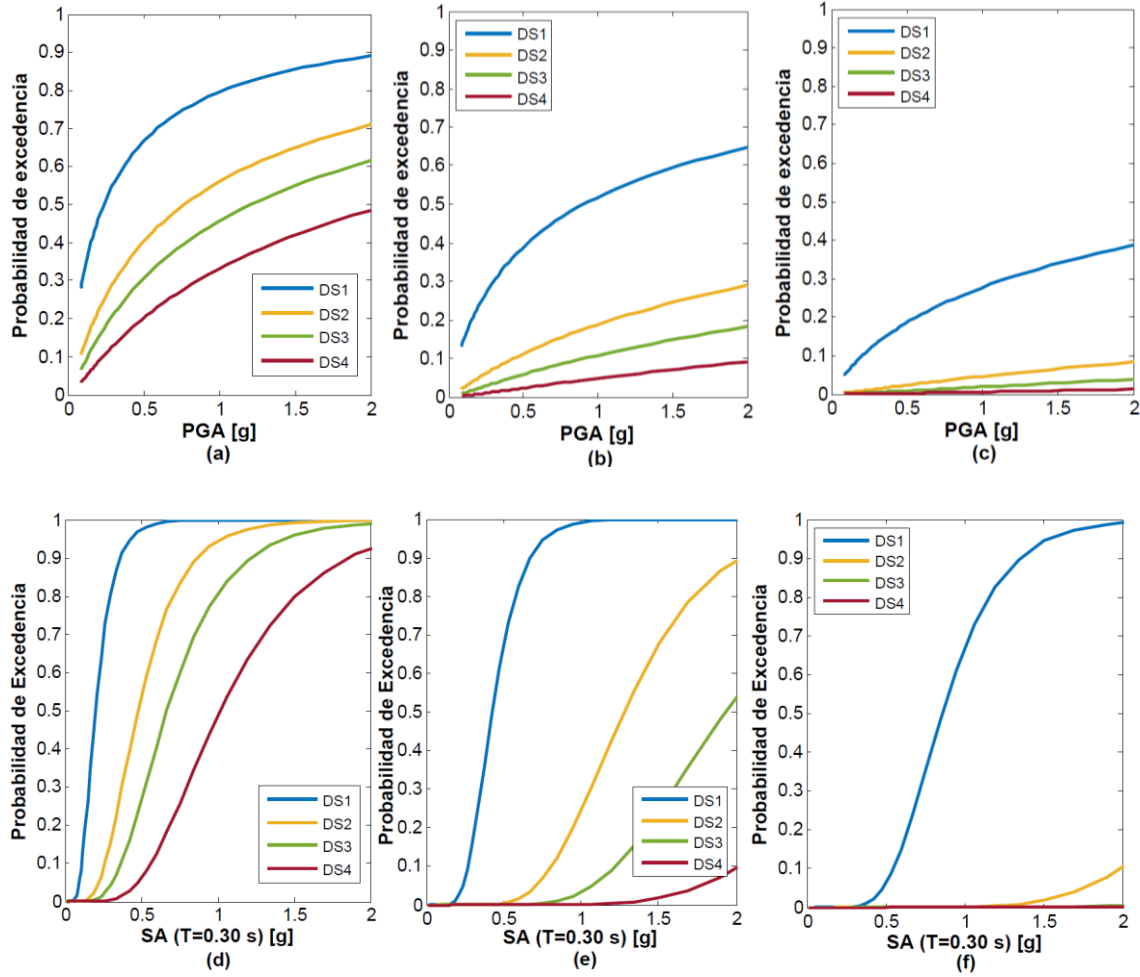
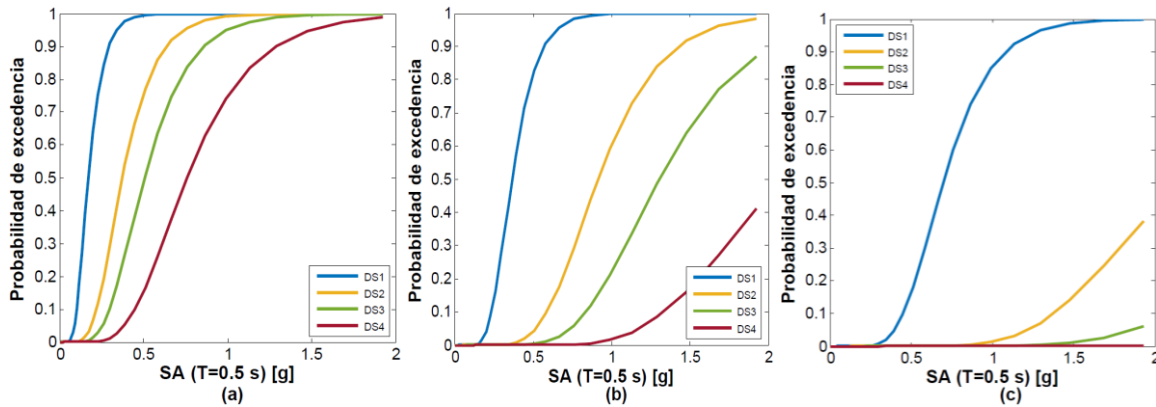


Figura 3.15. Funciones de fragilidad para estructuras de mampostería de baja altura (RM2/L) con la aceleración máxima del suelo (PGA) y SA ($T=0.3$ s). (a) y (d) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) y (e) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) y (f) Nivel de diseño sísmico alto.



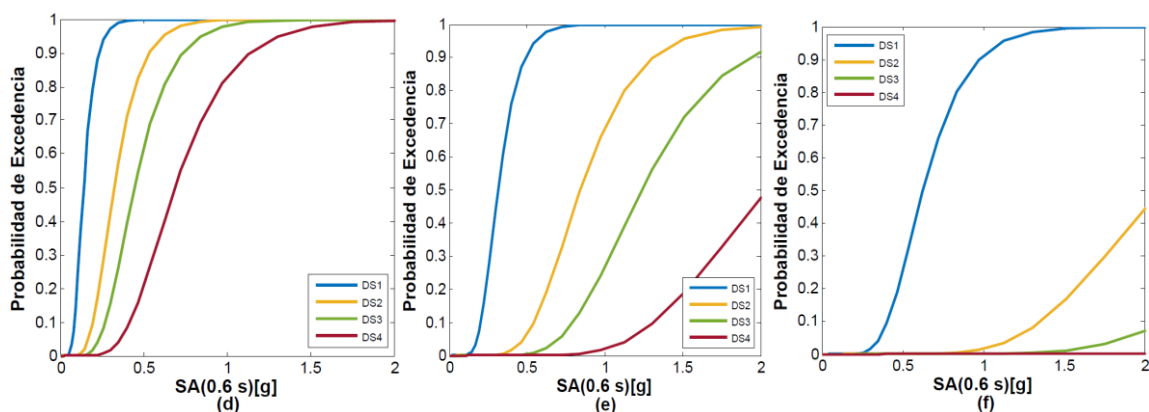


Figura 3.16. Funciones de fragilidad para estructuras de mampostería de mediana altura (RM2/M) con aceleraciones espectrales de SA ($T=0.5$ s) y SA ($T=0.6$ s). (a) y (d) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) y (e) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) y (f) Nivel de diseño sísmico alto.

Las funciones de fragilidad derivadas de las viviendas de mampostería de baja y mediana altura se comparan cada una con sus distintos niveles de diseño sísmico. En la Tabla 3.12 se muestra un resumen con la probabilidad de alcanzar o superar los distintos estados de daños en las viviendas de baja altura (RM2/L) para un valor esperado de 0.50 g de PGA y SA ($T=0.3$ s) y en las viviendas de mediana altura (RM2/M) para un valor esperado de 0.5 g de SA ($T=0.5$ s y $T=0.6$ s). Como ejemplo se puede observar que la probabilidad de daño disminuye para viviendas de baja altura (RM2/L) con un diseño sísmico moderado y alto, especialmente para los estados de daño DS3 y DS4, y en la mayoría de los casos la probabilidad de daño es nula para las viviendas de mediana altura (RM2/M) en el estado de daño DS3 y DS4 para un diseño sísmico moderado y alto.

Tabla 3.12. Probabilidad de daño en viviendas de baja y mediana altura en diferentes niveles de diseño sísmico.

Vivienda	Valor esperado	Estados de daño	Probabilidad de daño en niveles de diseño sísmico (%)		
			Bajo	Moderado	Alto
RM2/L (1-3 pisos)	0.5 g de PGA	DS1	66	38	18
		DS2	40	11	2
		DS3	30	6	0.8
		DS4	20	2	0.2
RM2/L (2-3 pisos)	0.5 g de SA ($T=0.3$ s)	DS1	97	71	6
		DS2	57	0.6	0
		DS3	30	0	0
		DS4	8	0	0
RM2/M (4-7 pisos)	0.5 g de SA ($T=0.5$ s)	DS1	100	80	18
		DS2	77	4	0
		DS3	50	0.3	0
		DS4	16	0	0

RM2/M (4-7 pisos)	0.5 g de SA (T=0.6s)	DS1	100	92	30
		DS2	90	6	0
		DS3	67	0	0
		DS4	25	0	0

3.2.6. Funciones de vulnerabilidad

Las funciones de fragilidad se convierten comúnmente en funciones de vulnerabilidad, que luego se pueden utilizar en la evaluación de pérdidas (V. Silva et al., 2013). VMTK se extiende a la derivación de estas curvas, mediante el cálculo de la distribución de probabilidad de índice de pérdida utilizando el modelo de fragilidad resultante y un modelo de daño a pérdida (es decir, la relación entre cada estado de daño y el correspondiente índice de pérdida).

El modelo de daño a pérdida utilizado es el descrito en (FEMA, 2015), cuyas razones de pérdida media para cada estado de daño se muestran en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Modelo de daño a pérdida utilizado para derivar funciones de vulnerabilidad.

Estado de Daño	Índice de pérdida esperada [LR]
Daño leve (DS1)	0.05
Daño moderado (DS2)	0.25
Daño extenso (DS3)	0.60
Daño completa (DS4)	1.00

El índice de pérdida media de las funciones de vulnerabilidad en cada nivel de medida de intensidad ($LR | IM$) es igual al producto entre la probabilidad de cada estado de daño ($P [DS = ds_i | IM]$) y el índice de pérdida media asociada (LR_{ds_i}), como se describe en la ecuación (3.2) (Martins et al., 2021).

$$LR|IM = \sum_{i=1}^{nDS} P[DS = ds_i | IM] \cdot LR_{ds_i} \quad (3.2)$$

Siguiendo este procedimiento y utilizando las funciones de fragilidad y el modelo de daños a pérdidas presentados anteriormente, se obtuvieron las funciones de vulnerabilidad representadas en la Figura 3.17 y Figura 3.18.

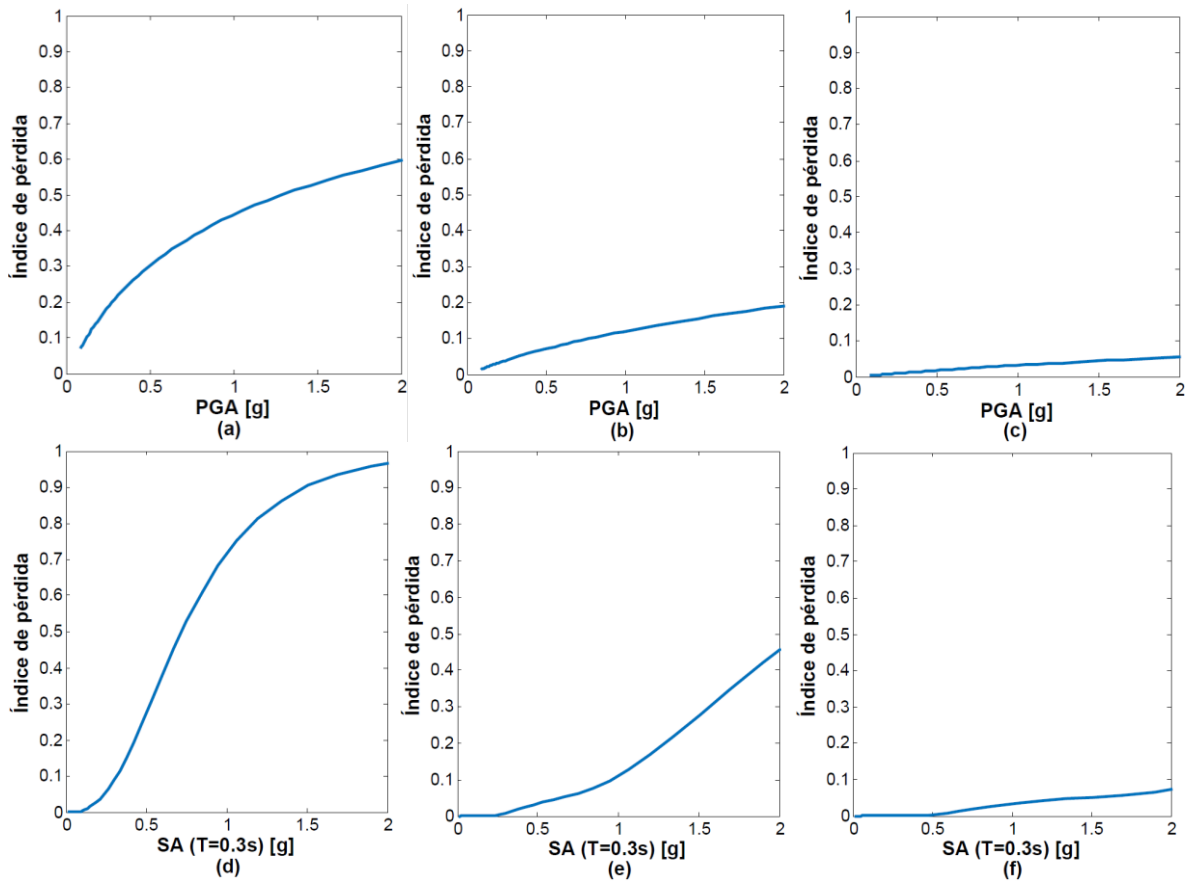
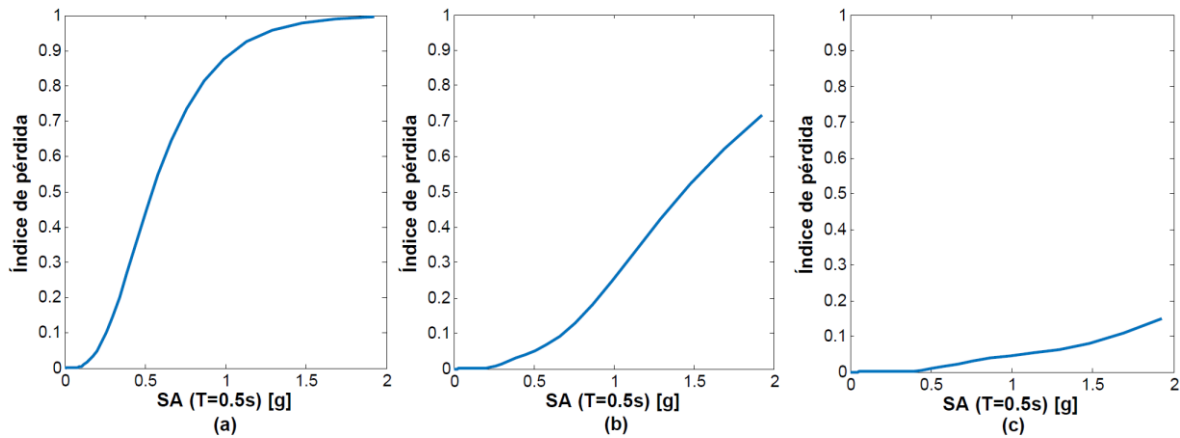


Figura 3.17. Funciones de vulnerabilidad para estructuras de mampostería de baja altura (RM2/L) con la aceleración máxima del suelo PGA y SA ($T=0.3$ s). (a) y (d) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) y (e) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) y (f) Nivel de diseño sísmico alto.



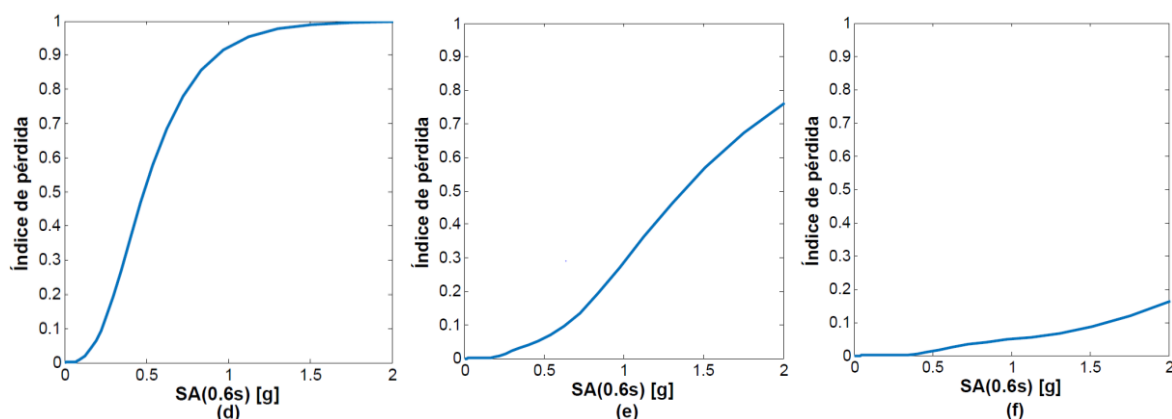


Figura 3.18. Funciones de vulnerabilidad para estructuras de mampostería de mediana altura (RM2/M) con aceleraciones espectrales de SA (0.5 s) y SA (T=0.6 s). (a) y (d) Nivel de diseño sísmico bajo, (b) y (e) Nivel de diseño sísmico moderado, (c) y (f) Nivel de diseño sísmico alto.

En la Tabla 3.14 se muestra un resumen con la probabilidad de índice de pérdida en las viviendas de baja altura (RM2/L) para un valor esperado de 0.50 g de PGA y SA (T=0.3 s) y en las viviendas de mediana altura (RM2/M) para un valor esperado de 0.50 g de SA (T=0.5 s y T=0.6 s). Como ejemplo se puede observar que el índice de pérdida es mínimo para viviendas de baja altura (RM2/L) y mediana altura (RM2/M) con un diseño sísmico moderado y alto, para un diseño sísmico bajo las estructuras de baja y mediana altura rondan en un 30% y 44 a 52% de probabilidad de índice de pérdida respectivamente.

Tabla 3.14. Índice de pérdida en viviendas de baja y mediana altura en diferentes niveles de diseño sísmico.

Vivienda	Valor esperado IM	Índice de pérdida en niveles de diseño sísmico (%)		
		Bajo	Moderado	Alto
RM2/L (1-3 pisos)	0.5 g de PGA	30	7	1.8
RM2/L (1-3 pisos)	0.5 g de SA (T=0.3s)	29	3.4	0.3
RM2/M (4-7 pisos)	0.5 g de SA (T=0.5s)	44	5	0.9
RM2/M (4-7 pisos)	0.5 g de SA (T=0.6s)	52	6	1.3

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIONES

4.1. Comparación de resultados en la región

A lo largo de capítulos anteriores, se ha subrayado que en la ciudad de Tijuana, la infraestructura predominante es la vivienda, y que el material de mampostería es el más comúnmente empleado en su construcción. Asimismo, se ha llevado a cabo un análisis dinámico de este tipo de estructuras, donde se han identificado las funciones de fragilidad y vulnerabilidad. Estas funciones se han calculado haciendo uso de las curvas de capacidad propuestas en HAZUS-MH (FEMA, 2012), complementadas con los procedimientos de la metodología VMTK (Martins et al., 2021).

Tabla 4.1. Estudios de vulnerabilidad sísmica de Tijuana de los últimos 20 años.

Estudio	Tipo de enfoque	Método	Elementos expuestos	Entrada	Resultado
Herramientas de evaluación de riesgo para diagnóstico de áreas urbanas contra desastres sísmicos (Rosquillas & Mendoza, 2000).	Empírico	Matrices de probabilidad de daño	Vivienda de concreto reforzado, de concreto no reforzado o ladrillo y de madera.	Matrices de daño calibradas para Quito, Ecuador y adaptadas para Tijuana.	Estados de daños
Aproximación a la vulnerabilidad estructural y socioeconómica en el marco de un estudio de riesgo sísmico en la zona urbana de Tijuana, Baja California (Garatachia et al., 2016).	Empírico	Identificación de región de máxima respuesta	Viviendas.	Periodo fundamental de la estructura y el periodo dominante del suelo.	Rangos de vulnerabilidad
Impacto socioeconómico del daño estructural por sismo en viviendas de 1 y 2 niveles en las ciudades de Baja California, México (González, 2016).	Analítico	HAZUS	Viviendas de 1 y 2 pisos de mampostería no confinada y cubierta de concreto aligerada.	Parámetros del modelo global de riesgo (Cardona et al., 2013), Normas Técnicas Complementarias de BC y mediciones del periodo fundamental de vibración.	Funciones de vulnerabilidad
Escenario de riesgo sísmico para la ciudad de Tijuana, Baja California (Romero, 2020).	Analítico	HAZUS	Viviendas de 1-6 pisos de mampostería confinada, concreto reforzado y madera.	Características estructurales.	Funciones de vulnerabilidad

Desarrollo de funciones de fragilidad y vulnerabilidad para estructuras de mampostería reforzada en México: Un caso de estudio (Díaz et al., 2023a)	Analítico	HAZUS y VMTK	Viviendas de mampostería confinada y reforzada de 1-5 pisos.	Registros de movimientos representativos de la región, curvas de capacidad de las viviendas en estudio, modelo de criterio daños y de daños a pérdidas.	Funciones de fragilidad y vulnerabilidad
---	-----------	--------------	--	---	--

En la Tabla 4.1 se presentan los estudios de vulnerabilidad sísmica realizados en la región en los últimos 20 años. Los estudios de Rosquillas y Mendoza, Garatachia, Baró y Huerta han adoptado un enfoque empírico, proporcionando resultados que incluyen estados de daño (ligero, moderado, significativo, mayor y destrucción) y rangos de vulnerabilidad (bajo, medio y alto), pero no han incluido funciones de vulnerabilidad en ninguno de estos estudios.

Por otro lado, González y Romero han desarrollado funciones de vulnerabilidad específicas para viviendas de mampostería no confinada y confinada en sus investigaciones. Estas funciones se basan en el modelo global de riesgos y en GEM Latinoamérica, respectivamente. Sin embargo, es importante señalar que en estos estudios no se ha definido el nivel de diseño sísmico.

En la Figura 4.1 se presentan funciones de vulnerabilidad diseñadas específicamente para estructuras de mampostería por diversos autores de la región. Entre ellas, destacan las desarrolladas por González, las cuales se enfocan en viviendas de mampostería no confinada de 1 y 2 pisos, clasificadas como MS/H1 y MS/H2, respectivamente. Por otro lado, Romero ha aportado funciones de vulnerabilidad destinadas a viviendas de mampostería confinada (MCF) de 1-5 pisos con una ductilidad moderada (DUM). Estas funciones se comparan con las del estudio actual, que se centran en viviendas de mampostería confinadas y reforzada (RM2) y se dividen en tres categorías según el nivel sísmico: bajo (L), moderado (M) y alto (H).

Se lleva a cabo una comparación de las funciones de vulnerabilidad empleadas por Romero, González y el estudio actual, todas ellas relacionadas con viviendas de un solo piso. El daño en este tipo de estructura está directamente vinculado a la aceleración máxima del suelo (PGA). En la Figura 4.1 se presentan los índices de pérdidas proporcionados por cada uno de los autores, considerando la medida de intensidad más desfavorable para las viviendas de un solo piso.

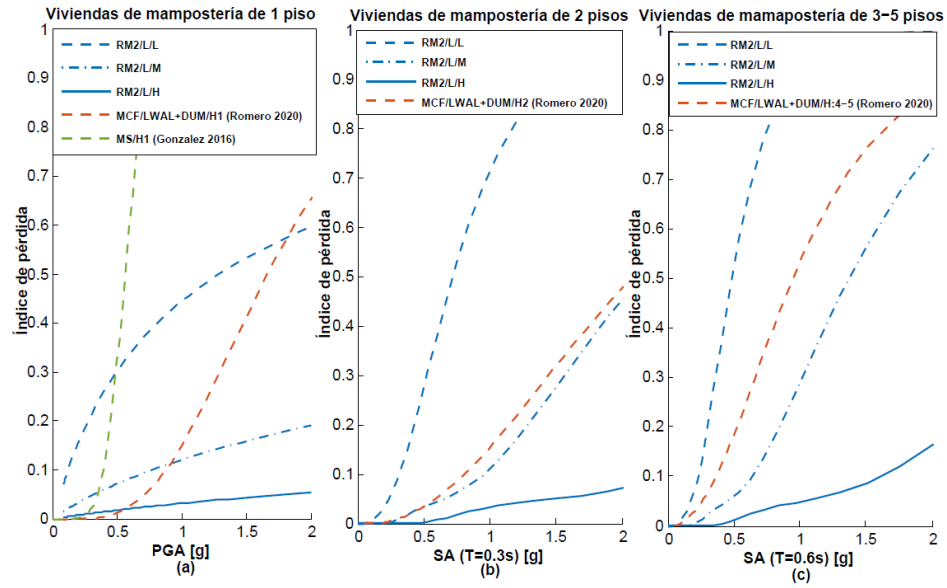


Figura 4.1. Comparación de funciones de vulnerabilidad para estructuras de mampostería en la región de Baja California, a) Viviendas de 1 piso con la aceleración máxima del suelo (PGA), b) Viviendas de 2 pisos con la aceleración espectral ($SA=0.3$ s) y c) Viviendas de 3-5 pisos con la aceleración espectral ($SA=0.6$ s).

Tabla 4.2. Comparación de resultados a nivel regional en viviendas de 1,2 y 3-5 pisos

Número de pisos	Valor esperado IM	Vivienda de mampostería	Índice de pérdida (%)
1 piso	0.5 g of PGA	RM2/L/L (Díaz et al., 2023a)	30
		RM2/L/M (Díaz et al., 2023a)	7
		RM2/L/H (Díaz et al., 2023a)	1.8
		MCF/LWAL+DUM/H1 (Romero, 2020)	1.3
		MS/H1 (González, 2016)	31
2 pisos	0.5 g of SA (T=0.30 s)	RM2/L/L (Díaz et al., 2023a)	30
		RM2/L/M (Díaz et al., 2023a)	3.4
		RM2/L/H (Díaz et al., 2023a)	0.3
		MCF/LWAL+DUM/H1 (Romero, 2020)	3.4
3-5 pisos	0.5 g of SA (T=0.60 s)	RM2/M/L (Díaz et al., 2023a)	52
		RM2/M/M (Díaz et al., 2023a)	6
		RM2/M/H (Díaz et al., 2023a)	1
		MCF/LWAL+DUM/H4-5 (Romero, 2020)	17.8

En la Tabla 4.2 se presenta un resumen que detalla la probabilidad de índice de pérdida en las viviendas de un solo piso, tal como se muestra en la Figura 4.1 (a). Esto se calcula considerando un valor esperado de 0.50 g de PGA, el cual se basa en las aceleraciones históricas registradas en la zona de estudio, que varían típicamente entre 0.20 y 0.50 g (González, 2016).

A pesar de que el enfoque del estudio de González se centra en viviendas de mampostería no confinada, se comparan estos resultados con las funciones de vulnerabilidad diseñadas para viviendas de mampostería confinada con diseño sísmico bajo. En general, las viviendas con diseño sísmico bajo no cumplen con los requisitos mínimos de resistencia sísmica, lo que sugiere una falta de confinamiento adecuado. Este resultado refleja una notoria similitud con los resultados de este trabajo, donde se observa un índice de pérdida cercano al 30%.

En contraste, en el estudio de Romero, el sistema constructivo de las viviendas es mampostería confinada, y se comparan con las funciones de vulnerabilidad diseñadas para viviendas de mampostería confinada con diseño sísmico alto. Estas viviendas con un diseño sísmico alto cumplen plenamente con los requisitos sísmicos establecidos por normas internacionales. El índice de pérdida reportado por Romero es de 1.3%, lo que se asemeja de cerca al índice de pérdida obtenido en este trabajo, que es igual a 1.8%.

Para el análisis de viviendas de dos pisos, se llevaron a cabo comparaciones entre el estudio actual y el de Romero, el cual ofrece los índices de pérdida asociados al daño experimentado por este tipo de estructuras. Estos índices están directamente relacionados con su propia aceleración, en particular, la aceleración espectral SA ($T=0.3$ s), tal como se ilustra en la Figura 4.1 (b).

En la Tabla 4.2 se presenta un resumen de los resultados de los índices de pérdida para viviendas de dos pisos. Los resultados obtenidos en el estudio de Romero muestran similitudes con las funciones de vulnerabilidad para un nivel de diseño sísmico moderado presentado en este trabajo, con un índice de pérdida del 3.4%.

También se llevó a cabo una comparación entre las funciones de vulnerabilidad presentadas en este estudio para viviendas de 3 a 5 pisos, considerando tres niveles de diseño sísmico: bajo, moderado y alto, y las desarrolladas por Romero para viviendas de 4-5 pisos ver Figura 4.1(c). Estos índices de vulnerabilidad están directamente vinculados con su propia aceleración, específicamente la aceleración espectral SA ($T=0.6$ s). Romero determinó un índice de pérdida del 17.8%, el cual es significativamente mayor que los valores obtenidos en este trabajo para las funciones con diseño sísmico moderado y alto.

4.2. Comparación de resultados a nivel internacional

Para las viviendas de un solo piso construidas con mampostería reforzada, la evaluación de daños está estrechamente vinculada a la aceleración máxima del suelo (PGA). Por otro lado, para viviendas de 2 pisos y las de 3-5 pisos, la evaluación de daños se relaciona directamente con la aceleración espectral, específicamente con SA ($T=0.3$ s) y SA ($T=0.6$ s), respectivamente. Esto nos permite evaluar de manera más precisa la vulnerabilidad de diferentes tipos de viviendas ante eventos sísmicos.

En la Figura 4.2, se presentan funciones de vulnerabilidad específicamente diseñadas para estructuras de mampostería reforzada, desarrolladas por algunos autores. Entre estas, se destacan las creadas por Romão, quien ha elaborado funciones destinadas a viviendas europeas, clasificándolas en tres niveles de ductilidad: baja (DUL), moderada (DUM) y alta (DUH) (Romão et al., 2022). Asimismo, Cardona ha contribuido con funciones de aplicabilidad global, idóneas para afrontar diversas amenazas sísmicas, siguiendo la metodología de HAZUS (Cardona et al., 2013). Las funciones presentadas en esta investigación, al igual que las de Cardona, se dividen en tres categorías correspondientes a niveles sísmicos bajos (L), moderados (M) y altos (H).

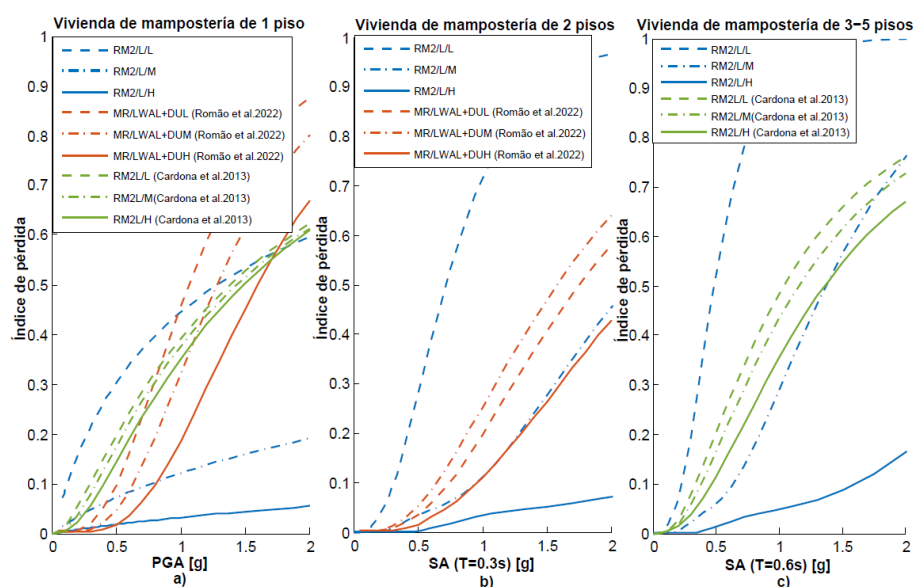


Figura 4.2. Comparación de funciones de vulnerabilidad para estructuras de mampostería reforzada, a) Viviendas de 1 piso con la aceleración máxima del suelo (PGA), b) Viviendas de 2 pisos con la aceleración espectral ($SA=0.3$ s) y c) Viviendas de 3-5 pisos con la aceleración espectral ($SA=0.6$ s).

En la Tabla 4.3 se presenta un resumen que refleja las probabilidades de índice de pérdida en distintos tipos de viviendas, incluyendo las de mampostería reforzada de un piso, dos pisos y de tres a cinco pisos. Estas probabilidades se calculan considerando una aceleración espectral de 0.5 g y se comparan con las aceleraciones históricas registradas en la zona de estudio, que pueden variar en un rango de 0.20 a 0.50 g (González, 2016).

Tabla 4.3. Comparación de resultados a nivel internacional en viviendas de 1,2 y 3-5 pisos

Número de pisos	Valor esperado IM	Vivienda de mampostería	Índice de pérdida (%)
1 piso	0.5 g of PGA	RM2/L/L (Díaz et al., 2023a)	30
		RM2/L/M (Díaz et al., 2023a)	7
		RM2/L/H (Díaz et al., 2023a)	1.8
		RM2L/L (Cardona et al., 2013)	19.7
		RM2L/M (Cardona et al., 2013)	17.4
		RM2L/H (Cardona et al., 2013)	14.4
		MR/LWAL+DUL (Romão et al., 2022)	9.7
		MR/LWAL+DUM (Romão et al., 2022)	4.7
		MR/LWAL+DUH (Romão et al., 2022)	1.8
2 pisos	0.5 g of SA (T=0.30 s)	RM2/L/L (Díaz et al., 2023a)	30
		RM2/L/M (Díaz et al., 2023a)	3.4
		RM2/L/H (Díaz et al., 2023a)	0.3
		MR/LWAL+DUL (Romão et al., 2022)	5.3
		MR/LWAL+DUM (Romão et al., 2022)	3.5
		MR/LWAL+DUH (Romão et al., 2022)	1.5
3-5 pisos	0.5 g of SA (T=0.60 s)	RM2/M/L (Díaz et al., 2023a)	52
		RM2/M/M (Díaz et al., 2023a)	6
		RM2/M/H (Díaz et al., 2023a)	1
		RM2M/L (Cardona et al., 2013)	20.1
		RM2M/M (Cardona et al., 2013)	16.4
		RM2M/H (Cardona et al., 2013)	11.2

Al analizar los índices de pérdida en las funciones de vulnerabilidad propuestas por diversos autores para viviendas de un solo piso, teniendo en cuenta un nivel de diseño sísmico bajo, podemos apreciar diferencias significativas. En particular, Romão presenta un índice de pérdida del 9.7%, mientras que Cardona y los resultados de esta investigación muestran cifras significativamente más elevadas, con un 19.7% y un 30%, respectivamente.

Para estas mismas viviendas, al considerar niveles de diseño sísmico moderado y alto, Romão reporta índices de pérdida del 4.7% y 1.8%, respectivamente. Estos valores muestran similitud con los resultados obtenidos en esta investigación, que registran un 7% y 1%, respectivamente.

Las funciones de vulnerabilidad propuestas en esta investigación se sometieron a una comparación con las de Romão, considerando viviendas de dos pisos y sus tres niveles de diseño sísmico: bajo, moderado y alto. En el caso de las viviendas con un nivel de diseño sísmico bajo, este trabajo revela un índice de pérdida del 30%, siendo mayor en comparación con el índice de pérdida presentado por Romão, que es del 5.3%. Sin embargo, se observa una similitud en el índice de pérdida en los casos de diseño sísmico moderado y alto.

Se realizó una comparación entre las funciones de vulnerabilidad presentadas en este estudio y las desarrolladas por Cardona para viviendas de 3 a 5 pisos en tres niveles de diseño sísmico: bajo, moderado y alto. En el caso de las viviendas con un nivel de diseño sísmico bajo, este trabajo revela un índice de pérdida del 52%, siendo mayor en comparación con el índice de pérdida presentado por Cardona, que es del 20.1%. Por otro lado, en viviendas con un nivel de diseño sísmico moderado y alto, los valores de índice pérdida obtenidos en este estudio, que son del 6% y 1% respectivamente, son inferiores a los presentados por Cardona.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES

1. Utilizando la información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, encuestas virtuales y opinión de expertos, se realizó un inventario físico y clasificación de estructuras en la ciudad de Tijuana, Baja California, se encontró que el elemento más común y de mayor exposición son las viviendas de mampostería de 1 a 5 pisos confinadas o reforzadas, para diseño dúctil y no dúctil, considerando niveles de diseño sísmico bajo, moderado y alto.

2. Se realizó un análisis probabilístico de peligro sísmico, para el cual se identificaron las fuentes de posibles terremotos en el noroeste de Baja California en la ciudad de Tijuana principalmente, se evaluó la sismicidad de las fuentes a partir de la relación de recurrencia, para este caso se utilizó el modelo de *Gutenberg-Richter*; se desarrolló el modelo de atenuación del movimiento del suelo, utilizando la ecuación predictiva de *Boore-Atkinson* disponible para la región Oeste de Estados Unidos; para diferentes puntos de interés se generaron las curvas de peligro, desagregado sísmico, contribuciones de peligro sísmico y espectros de peligro uniforme, con esta información se seleccionaron 70 registros de acelerogramas de base de datos (*Center for Engineering Strong Motion* (CESMD) y de la Red de Acelerógrafos del Noroeste de México (RANM)) de estaciones que estuvieran en lugares con características físicas y ambientes tectónicos similares a cada sitio de interés.

3. A través del empleo de la plataforma de código abierto VMTK, se ha seleccionado una opción viable para analizar las funciones de fragilidad y vulnerabilidad en diversas estructuras, abarcando tanto ámbitos regionales como internacionales. Se llevó a cabo un modelado de vulnerabilidad específicamente para la ciudad de Tijuana. Este proceso incluyó la selección de todos los registros de movimiento del suelo, la definición de la capacidad estructural mediante el manual de HAZUS, la ejecución de un análisis dinámico no lineal en osciladores de grado único de libertad (SDOF) para estimar la respuesta del edificio ante cargas sísmicas, la definición de funciones de fragilidad para cada estado de daño, y la derivación de funciones de vulnerabilidad utilizando un modelo de daño a pérdida de FEMA. Antes de implementar esta plataforma, resulta fundamental examinar minuciosamente sus limitaciones y garantizar una comprensión plena de las características necesarias para lograr una adaptación eficiente.

4. En el proceso de modelado de vulnerabilidad, se obtuvieron funciones de vulnerabilidad para viviendas de mampostería confinadas, tanto de baja altura (1 a 3 pisos) como de mediana altura (4-7 pisos), considerando niveles de diseño sísmico bajo, moderado y alto. Estas funciones fueron comparadas con investigaciones anteriores en la región, que emplearon funciones de vulnerabilidad de Centroamérica (González, 2016; Rodríguez Valenzuela et al., 2020) y América del Sur (Romero, 2020). Se identificaron similitudes en la probabilidad de índice de pérdida en las viviendas de baja altura para diferentes valores esperados de intensidad sísmica (IM) y niveles de diseño sísmico.

Adicionalmente, se llevaron a cabo comparaciones con estudios internacionales, incluyendo funciones diseñadas para viviendas europeas (Romão et al., 2022) y funciones de aplicabilidad global (Cardona et al., 2013), revelando notables discrepancias. Estas diferencias pueden generar una mayor incertidumbre en la estimación de daños y pérdidas en escenarios de riesgo.

En el caso específico de la ciudad de Tijuana, que se encuentra en una zona de alta actividad sísmica, no se cuenta con información recopilada sobre daños causados por terremotos previos a la generación de estas funciones de vulnerabilidad. Además, no existe una sección en la normativa que aborde el uso específico de funciones de vulnerabilidad para viviendas de mampostería. Esto ha llevado a otros autores, como (González, 2016; Rodríguez Valenzuela et al., 2020; Romero, 2020), a utilizar funciones de vulnerabilidad de otras partes del mundo para llevar a cabo sus evaluaciones de riesgo.

Este trabajo introduce un procedimiento fundamentado en metodologías de acceso abierto que brinda la posibilidad a otros usuarios, en especial a aquellos con limitado acceso a datos e información, de desarrollar sus propias funciones de vulnerabilidad adaptadas a su zona de estudio y a diversos tipos de estructuras. Estas funciones pueden ser empleadas para estimar daños y pérdidas en situaciones de riesgo, desempeñando un papel fundamental en la reducción de la incertidumbre en los cálculos de análisis de riesgo.

REFERENCIAS

- Acevedo, A. B., Jaramillo, J. D., Yepes, C., Silva, V., Osorio, F. A., & Villar, M. (2017). Evaluation of the seismic risk of the unreinforced masonry building stock in Antioquia, Colombia. *Natural Hazards*, 86, 31–54. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2647-8>
- Achs, G., & Adam, C. (2012). Rapid seismic evaluation of historic brick-masonry buildings in Vienna (Austria) based on visual screening. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(6), 1833–1856. <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9376-5>
- Acosta, J., Arellano, G., Ruiz, E., Mendoza, L., Reyes, R., Rocha, E. Microzonificación Sísmica de Tijuana; Fondo Nacional para la Prevención de Desastres Naturales: Tijuana, Mexico, 2009.
- Ajay Kumar, S., Rajaram, C., Mishra, S., Pradeep Kumar, R., & Karnath, A. (2017). Rapid visual screening of different housing typologies in Himachal Pradesh, India. *Natural Hazards*, 85(3), 1851–1875. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2668-3>
- Anderson, J. G., Rockwell, T., & Agnew, D. (1989). Past and Possible Future Earthquakes of Significance to the San Diego Region. *Earthquake Spectra*, 5(2), 299–335. <https://doi.org/10.1193/1.1585524>
- Arce, R. Estimación de Peligro Sísmico en el Norte de BC, con Aplicación en el Cálculo de la Respuesta Dinámica de dos Edificios, Tesis Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, México, 2016. Disponible en línea: <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/956> (consultado el 15 febrero 2022).
- Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., Corazza, L., Della Bella, M., Di Pasquale, G., Dolce, M., Goretti, A., Martinelli, A., Orsini, G., et al. Manuale per la compilazione della scheda di primo livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AEDES), Italia, 2014. Disponible en línea: <https://www.protezionecivile.gov.it/it/pubblicazione/manuale-la-compilazione-della-scheda-di-primo-livello-di-rilevamento-di-danno-pronto-intervento-e-agibilita-edifici-ordinari-nellemergenza-post/> (consultado el 5 September 2023).
- Benedetti, D., Benzoni, G., & Parisi, M. A. (1988). Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 183–201. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160203>
- Bhattacharya, S., Orense, R., & Lombardi, D. (2019). Basic concepts of engineering seismology and seismic hazard analysis. *Seismic Design of Foundations*, 33–61. <https://doi.org/10.1680/sdof.61668.033>
- Boissonnade, A. C., & Shah, H. C. (1984). Seismic Vulnerability and Insurance Studies. *The Geneva Papers on Risk and Insurance - Issues and Practice*, 9(3), 223–254. <https://doi.org/10.1057/gpp.1984.13>

- Boore, D. M., & Atkinson, G. M. (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 99–138. <https://doi.org/10.1193/1.2830434>
- Borzi, B., Crowley, H., & Pinho, R. (2008). Simplified pushover-based earthquake loss assessment (SP-BELA) method for masonry buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 2(4), 353–376. <https://doi.org/10.1080/15583050701828178>
- Cardona, O.; Ordaz, M.; Reinoso, E. (2012). CAPRA–comprehensive approach to probabilistic risk assessment: International initiative for risk management effectiveness. *In Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 24–28 September*; Volume 1, p. 10. Disponible en línea: http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0726.pdf (consultado el 21 agosto 2023).
- Cardona, O.D.; Ordaz, M.; Yamin, L.E.; Singh, S.; Barbat, A.H.; Bernal, G.A.; Salgado, M.A.; Mora, M.G.; Velásquez, C.A.; Olaya, J.C.; et al. Modelación Probabilista de Riesgos Naturales en el Nivel Global: El Modelo Global de Riesgo. Modelos Globales de Terremoto y Ciclón y Evaluación de Riesgo de Desastres de los Países para las Amenazas de Terremoto, Ciclón e Inundaciones; Consorcio CINME, INGENIAR, ITEC, EAI, Geneva, Suiza, 2013.
- Catulo, R., Falcão, A. P., Bento, R., & Ildefonso, S. (2018). Simplified evaluation of seismic vulnerability of Lisbon Heritage City Centre based on a 3D GIS-based methodology. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.014>
- Chieffo, N., Clementi, F., Formisano, A., & Lenci, S. (2019). Comparative fragility methods for seismic assessment of masonry buildings located in Muccia (Italy). *Journal of Building Engineering*, 25(May). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100813>
- Cornell, C. A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583–1606.
- CRED, (2020). Human cost of disasters an overview of the last 20 years 2000-2019 . *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*. <https://doi.org/10.18356/79b92774-en>
- Crowley, J. (2014). Open data for resilience initiative field guide. *Global Facility for Disaster Reduction and Recovery*, 134.
- D'Ayala, D. (2005). Force and displacement based vulnerability assessment for traditional buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 3(3), 235–265. <https://doi.org/10.1007/s10518-005-1239-x>
- D'Ayala, D. (2013). Assessing the seismic vulnerability of masonry buildings. *In Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems*. <https://doi.org/10.1533/9780857098986.3.334>

- D'Ayala, D., & Speranza, E. **(2003)**. Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings. *Earthquake Spectra*, 19(3), 479–509. <https://doi.org/10.1193/1.1599896>
- Díaz, F. D., González-Durán, M., Flores, D. L., López-Lambrano, A., Mena-Hernández, U., & Villada-Canela, M. **(2023a)**. Development of Fragility and Vulnerability Functions for Reinforced Masonry Structures in Mexico: A Case Study. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/app131910634>
- Díaz, F. D., González-Durán, M., Flores, D. L., López-Lambrano, A., Mena-Hernández, U., & Villada-Canela, M. **(2023b)**. Methodologies for the evaluation of seismic vulnerability in masonry structures. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 14007–14028. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.4670
- El-Betar, S. A. (2018). Seismic vulnerability evaluation of existing R.C. buildings. *HBRC Journal*, 14(2), 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2016.09.002>
- EMS. **(1998)**. Escala Macro Sísmica Europea, EMS - 98. Conseil de L'Europe Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. (Vol. 15). Disponible en línea: [http://lib.riskreductionafrica.org/bitstream/handle/123456789/1193/1281.European Macroseismic Scale 1998.pdf?sequence=1](http://lib.riskreductionafrica.org/bitstream/handle/123456789/1193/1281.European%20Macroseismic%20Scale%201998.pdf?sequence=1)
- FEMA. Hazus–MH 2.1: Technical Manual;Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, USA, **2012**.
- FEMA. Technical and User's Manual of Advanced Engineering Building Module (AEBM) “Hazus MH 2.1.” Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, USA, **2015**.
- FEMA 310. Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings: A Prestandard. Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, USA, **1998**.
- FEMA P-155. FEMA-155: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards : Supporting Documentation. Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, USA, **2015**. <https://doi.org/10.4231/D3M90238V>
- Ferreira, T. M., Maio, R., Costa, A. A., & Vicente, R. **(2017)**. Seismic vulnerability assessment of stone masonry façade walls: Calibration using fragility-based results and observed damage. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 103(January), 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.09.006>
- Garatachia, J. C., Baró Suárez, J. E., & Huerta López, C. I. Capítulo 1. Libro: Aproximación a la vulnerabilidad estructural y socioeconómica en el marco de un estudio de riesgo sísmico en la zona urbana de Tijuana, Baja California. Vulnerabilidad Territorial ante la Expansión Urbana (Universida). Universidad de México: CDMEX, Mexico,**2016**.

- Godínez-Domínguez, E. A., Tena-Colunga, A., Pérez-Rocha, L. E., Archundia-Aranda, H. I., Gómez-Bernal, A., Ruiz-Torres, R. P., & Escamilla-Cruz, J. L. (2021). The September 7, 2017 Tehuantepec, Mexico, earthquake: Damage assessment in masonry structures for housing. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 56(July 2020). <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102123>
- González, M. Impacto socioeconómico del daño estructural por sismo en viviendas de 1 y 2 niveles en las ciudades de Baja California, México. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Baja California, México, 2016.
- Gutenberg, B., & Richter, C. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 4(34), 185–188. <https://doi.org/10.1038/156371a0>
- INEGI. Panorama Sociodemográfico de Baja California, Mexico, 2021, INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Disponible en línea: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197735.pdf (Consultado el 15 febrero 2022).
- INEGI. Anuario Estadístico y Geográfico de Baja California, Mexico, 2017, INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Disponible en línea: https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825094874.pdf (consultado el 15 febrero 2022).
- Jalayer, F. Direct Probabilistic Seismic Analysis : Implementing Non-Linear Dynamic Assessments. Tesis Doctoral, Universidad de Stanford, California, Estados Unidos, 2003.
- Jalayer, Fatemeh, De Risi, R., & Manfredi, G. (2015). Bayesian Cloud Analysis: Efficient structural fragility assessment using linear regression. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(4), 1183–1203. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9692-z>
- Kappos, A. J., Panagopoulos, G., & Penelis, G. G. (2008). Development of a seismic damage and loss scenario for contemporary and historical buildings in Thessaloniki, Greece. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(10–11), 836–850. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.10.017>
- Kassem, M. M., Mohamed Nazri, F., & Noroozinejad Farsangi, E. (2020). The seismic vulnerability assessment methodologies: A state-of-the-art review. *Ain Shams Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.04.001>
- Kramer, S. L. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall. New Jersey 1996.
- Lagomarsino, S., & Giovinazzi, S. (2006). Macro seismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 415–443. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9024-z>

- Lantada, M. N. Evaluación Del Riesgo Sísmico Mediante Métodos Avanzados Y Técnicas Gis., Tesis Doctoral, Universidad Politécnica De Cataluña, Barcelona España **2007**. Disponible en línea: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6259/04Nlz04de12.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Lopez, R., Suarez, L. E., Herrera, J. C., & Santiago, A. **(2001)**. Verificación de las curvas de capacidad de HAZUS para Puerto Rico. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 1(1). Disponible en línea: https://www.scipedia.com/public/Lopéz_et_al__2001a
- Martins, L., & Silva, V. **(2018)**. A global database of vulnerability models for seismic risk assessment. *Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering*, 1–10.
- Martins, L., & Silva, V. **(2020)**. Development of a fragility and vulnerability model for global seismic risk analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 6719–6745. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00885-1>.
- Martins, L., Silva, V., Crowley, H., & Cavalieri, F. **(2021)**. Vulnerability modellers toolkit, an open-source platform for vulnerability analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 5691–5709. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01187-w>.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. **(2006)**. Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSEES) user command-language manual. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, 465.
- MDOC-15. Manual de Diseño de Obras Civiles (Diseño por sismo), Comision Federal de Electricidad, México, **2015**.
- Medina, R., & Music, J. **(2018)**. Determinación del nivel de desempeño de un edificio habitacional estructurado en base a muros de hormigón armado y diseñado según normativa chilena. *Obras y Proyectos*, 23, 63–77. <https://doi.org/10.4067/s0718-28132018000100063>
- Molina, S., Lang, D. H., & Lindholm, C. D. **(2010)**. SELENA - An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure. *Computers and Geosciences*, 36(3), 257–269. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.07.006>
- Morales-Esteban, A., Justo, J. L., Martínez-Álvarez, F., & Azañón, J. **(2012)**. Probabilistic method to select calculation accelerograms based on uniform seismic hazard acceleration response spectra. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.07.003>
- Munguia, L. Result of a preliminary earthquake hazard study in north Baja California, Mexico. SSA 2014 Annual Meeting Announcement. In *Seismological Research Letters* **2014**, 85, 365–558. <https://doi.org/10.1785/0220140014>.

- OpenQuake **(2019)**. Indicadores de Riesgo en México. Disponible en línea: <https://downloads.openquake.org/countryprofiles/>
- Park, Y. J., Ang, A. H.-S., & Ween, Y. K. **(1987)**. Damage-Limiting Aseismic Design of Buildings. *Earthquake Spectra*, 3(1), 1–26. <https://doi.org/doi:10.1193/1.1585416>
- Pavel, F., Calotescu, I., Vacareanu, R., & Sandulescu, A. M. **(2018)**. Assessment of seismic risk scenarios for Bucharest, Romania. *Natural Hazards*, 93(122), 25–37. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2991-3>
- Rajarathnam, S., & Santhakumar, A. R. **(2015)**. Assessment of seismic building vulnerability based on rapid visual screening technique aided by aerial photographs on a GIS platform. *Natural Hazards*, 78(2), 779–802. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1382-2>
- Rodríguez Valenzuela, L. M., Mungaray Moctezuma, A., González-Durán, M., & Mena Hernández, U. **(2020)**. Structural damage to housing and effects on users due to seismic risk: a case study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer*, Cl, 1–47. <https://doi.org/10.1680/jmuen.18.00025>
- Romão, X., Pereira, N., Castro, M., De Maio, F., Crowley, H., Silva, V., & Martins. **(2022)**. European_Building_Vulnerability_Database. Disponible en línea: https://gitlab.seismo.ethz.ch/efehr/esrm20_vulnerability/-/blob/master/European_Building_Vulnerability_Database.xlsx (Consultado 5 de septiembre 2023)
- Romero, P. Escenario de riesgo sísmico en la ciudad de Tijuana, Baja California. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Mexico, **2020**.
- Rosquillas, A.; Mendoza, L. Proyecto RADIUS Case Tijuana (Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters), 2nd ed.; CICESE y XVI Ayuntamiento de Tijuana: Tijuana, México, **2000**; pp.27–28.
- Rosquillas, A., Mendoza, L., Gonzalez, V., Rocha, E., & Moldrano, R. **(2000)**. Atlas de riesgo del municipio de Tijuana, B.C.
- Serrano-Lanzarote, B., & Temes-Córdovez, R. **(2015)**. Vulnerabilidad y riesgo sísmico de los edificios residenciales estudiados dentro del Plan Especial de evaluación del riesgo sísmico en la Comunidad Valenciana. *Informes de La Construcción*, 67(539). <https://doi.org/10.3989/ic.13.182>
- Silva, L. **(2019)**. Crónicas de seis siglos de sismos en México: lecciones aprendidas y perspectivas (Asociación). Disponible en línea: www.amis.com.mx

- Silva, V., Casotto, C., Rao, A., Villar, M., Crowley, H., & and Vamvatsikos, D. **(2015)**. OpenQuake Risk Modeller's Toolkit - User Guide. Global Earthquake Model (GEM). *Technical Report 2015-09*. Disponible en línea: <https://doi.org/10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.RMTK.1.0/02>, 97 pages.
- Silva, V., Crowley, H., Pinho, R., & Varum, H. **(2013)**. Extending displacement-based earthquake loss assessment (DBELA) for the computation of fragility curves. *Engineering Structures*, 56, 343–356. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.04.023>
- Silva, V., Crowley, H., Varum, H., Pinho, R., & Sousa, R. **(2014)**. Evaluation of analytical methodologies used to derive vulnerability functions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(2), 181–204. <https://doi.org/10.1002/eqe.2337>
- Silva, Vítor. **(2019)**. Uncertainty and correlation in seismic vulnerability functions of building classes. *Earthquake Spectra*, 4(35), 1515–1539. <https://doi.org/10.1193/013018EQS031M>
- Soares, J. Aplicación de la microzonación sísmica a la seguridad de estructuras críticas en la ciudad de Ensenada. Tesis de Maestria, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Mexico, **2003**.
- Stafford, P. J. **(2008)**. Conditional prediction of absolute durations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(3), 1588–1594. <https://doi.org/10.1785/0120070207>
- UN-CRED. **(2020)**. Human cost of disasters (2000-2019). *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*, 61, 1–2. <https://doi.org/10.1186/s12889>. Disponible en línea. <https://cred.be/sites/default/files/CRED-Disaster-Report- Human-Cost2000-2019.pdf>
- Vicente, R., Parodi, S., Lagomarsino, S., Varum, H., & Silva, J. A. R. M. **(2011)**. Seismic vulnerability and risk assessment: Case study of the historic city centre of Coimbra, Portugal. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(4), 1067–1096. <https://doi.org/10.1007/s10518-010-9233-3>
- Villar-Vega, M., Silva, V., Crowley, H., Yepes, C., Tarque, N., Acevedo, A. B., Hube, M. A., Gustavo, C. D., & María, H. S. **(2017)**. Development of a fragility model for the residential building stock in South America. *Earthquake Spectra*, 33(2), 581–604. <https://doi.org/10.1193/010716EQS005M>
- Wallemacq, P., & Below, R. **(2018)**. Natural disasters in 2017: Lower mortality, higher cost. *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)*, 50, 2. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27820.92808>
- Whitman, R. V., Reed, J. W., & Hong, S.-T. **(1974)**. Earthquake Damage Probability Matrices. In *Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy* (pp. 2531–2540).

Yamin, L. E., Hurtado, A., Rincon, R., Dorado, J. F., & Reyes, J. C. **(2017)**. Probabilistic seismic vulnerability assessment of buildings in terms of economic losses. *Engineering Structures*, 138, 308–323. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.013>