

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil**

**Modelos de consecuencias y la valoración de su impacto en evaluaciones
del riesgo sísmico físico**

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Francisco Rodríguez Herrera

Director de Trabajo de Graduación:

Ing. Luis Carlos Esquivel Salas, MSc.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

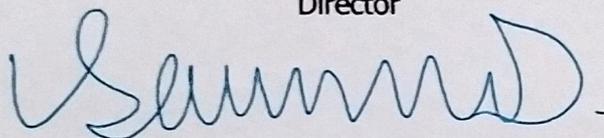
Hoja de aprobación

Miembros del Comité Asesor



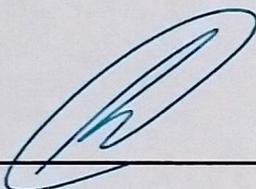
Ing. Luis Carlos Esquivel Salas, M. Sc.

Director



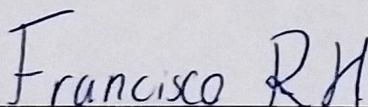
Ing. Víctor Schmidt Díaz, Ph.D.

Asesor



Ing. Diego Hidalgo Leiva, Ph.D.

Asesor



Francisco Rodríguez Herrera

Estudiante

Derechos de propiedad intelectual

Fecha: 2022, febrero, 15

El suscrito, Francisco Rodríguez Herrera, cédula 2-0767-0147, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B56040, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación "**Modelos de consecuencias y la valoración de su impacto en evaluaciones del riesgo sísmico físico**", bajo la Dirección del **MSc. Luis Carlos Esquivel Salas**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

A mi mamá Rocío

A mi papá Roberto

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por ser mi apoyo durante todo el proceso de la universidad y de esta investigación.

Quiero agradecer al director de este proyecto, Luis Carlos Esquivel por confiar este tema en mí, por el compromiso, por los valiosos consejos y guía sin los cuales no hubiera sido posible desarrollar esta investigación. También un agradecimiento a los asesores Víctor Schmidt y Diego Hidalgo por el compromiso y valiosas observaciones que permitieron mejorar este trabajo.

Quiero agradecer a la Fundación Global Earthquake Model (GEM) y los profesionales que forman parte de esta, por la gran misión que tienen en el campo del riesgo sísmico a nivel global, y por permitir el acceso a muchos estudios y software que han generado. Una mención especial a Alejandro Calderón por el taller de OpenQuake impartido y por la colaboración brindada con algunos temas consultados, lo cual fue de gran ayuda para mí en esta investigación.

Finalmente, quiero agradecer a mis amigos que también han estado conmigo en tantas experiencias vividas a lo largo de este proceso.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Justificación	1
1.1.1	El problema específico	1
1.1.2	Importancia	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo General	3
1.2.2	Objetivos específicos	3
1.3	Delimitación del problema	4
1.3.1	Alcance	4
1.3.2	Limitaciones.....	5
1.4	Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....	5
1.5	Metodología	8
2	Marco teórico.....	11
2.1	Riesgo sísmico.....	11
2.2	Amenaza sísmica	11
2.2.1	Magnitud sísmica.....	12
2.2.2	Intensidad sísmica.....	12
2.3	Fragilidad.....	12
2.3.1	Estados de daño	12
2.3.2	Función de Fragilidad.....	14
2.4	Vulnerabilidad.....	16
2.4.1	Pérdidas	16
2.4.2	Costo de reposición	17
2.4.3	Costo de reparación	17
2.4.4	Función de vulnerabilidad	17

2.5	Consecuencias.....	18
2.5.1	Metodologías para desarrollar modelos de consecuencias.	19
2.5.2	Pérdidas económicas	22
2.5.3	Víctimas	24
2.5.4	Escombros.....	26
2.6	Incertidumbre asociada al riesgo sísmico	29
3	Modelos de consecuencias estudiados.....	31
3.1	Pérdidas económicas.....	31
3.1.1	FEMA (2020).....	34
3.1.2	Yepes y Silva (2017).....	37
3.1.3	Bal et al. (2008).....	37
3.1.4	Durukal et al. (2006)	38
3.1.5	Di Pasquale et al. (2005).....	39
3.1.6	Kostov et al. (2004).....	39
3.1.7	Milutinovic y Trendafiloski (2003)	39
3.1.8	FEMA (1999).....	40
3.2	Víctimas.....	40
3.2.1	FEMA (2020).....	41
3.2.2	Miyamoto (2016).....	43
3.2.3	So y Pomonis (2012)	44
3.2.4	Jaiswal y Wald (2010).....	45
3.2.5	Spence (2007)	46
3.3	Escombros	48
3.3.1	FEMA (2020).....	48
3.3.2	Miyamoto (2016).....	50

4	Generación de curvas de vulnerabilidad a partir de funciones de fragilidad y de consecuencias	52
4.1	Metodología de GEM	52
4.2	Resultados	57
5	Caso de estudio.....	59
5.1	Amenaza: Falla de Cipreses	59
5.2	Modelo de exposición	61
5.3	Modelo de fragilidad.....	62
5.3.1	Nivel 1: Taxonomía base agrupadas.....	62
5.3.2	Nivel 2: Taxonomías base	62
5.3.3	Nivel 3: Taxonomía	63
5.4	Pérdidas económicas directas.....	63
5.4.1	Grupo 1: FEMA (2020), FEMA (1999), Milutinovik y Trendafiloski (2003), y Kostov et al. (2003).....	66
5.4.2	Grupo 2: Yepes y Silva (2017), y Durukal et al. (2006)	67
5.4.3	Grupo 3: Bal et al. (2006)	67
5.4.4	Según taxonomía	68
5.5	Víctimas.....	73
5.5.1	FEMA (2020).....	77
5.5.2	Miyamoto (2016).....	77
5.5.3	Jaiswal y Wald (2010).....	78
5.5.4	So y Pomonis (2012) con Spence (2007).....	80
5.6	Escombros	81
6	Conclusiones y recomendaciones	88
6.1	Conclusiones	88
6.2	Recomendaciones.....	89

7	Bibliografía.....	91
8	Apéndices.....	96
	Apéndice A. Equivalencia de tipologías propuesta para la estimación de víctimas.....	96
	Apéndice B. Mapas de pérdidas económicas.....	98
Índice de figuras		
	Figura 1.1. Diagrama de flujo de la metodología.....	8
	Figura 2.1. Ejemplo de curva de fragilidad	16
	Figura 2.2. Ejemplo de una curva de vulnerabilidad	18
	Figura 2.3. Enfoque de cada tipo de metodología de desarrollo de modelos de consecuencias.	19
	Figura 2.4. Ejemplo de curva de fragilidad.	22
	Figura 4.1. Curva de fragilidad para la tipología MCF_1.	54
	Figura 4.2. Curva de vulnerabilidad de la tipología MCF_1, aplicando el modelo de consecuencias FEMA (2020).....	55
	Figura 4.3. Módulo de vulnerabilidad del programa VMTK.....	56
	Figura 4.4. Gráfica de comparación de curvas de vulnerabilidad generadas utilizando Excel y el programa VMTK para la tipología CR_D_A.....	57
	Figura 4.5. Curva de vulnerabilidad de la tipología MCF_1, aplicando el modelo de consecuencias Jaiwal y Wald (2010).....	58
	Figura 5.1. Ubicación de la falla y percepción de intensidad en 196 barrios del cantón Central de San José para el escenario planteado.....	60
	Figura 5.2. Distribución de estructuras según su estado de daño para la amenaza modelada.	64
	Figura 5.3 Gráfico de comparación de las pérdidas estimadas y la relación de dichas perdidas con respecto al valor total del portafolio.....	66
	Figura 5.4. Distribución de pérdidas por grupos de taxonomía según los distintos modelos de consecuencias.....	69
	Figura 5.5. Distribución de las taxonomías con las cinco mayores pérdidas estimadas según los distintos modelos de consecuencias.....	70
	Figura 5.6. Distribución de los distritos con las cuatro mayores pérdidas estimadas según los distintos modelos de consecuencias.....	71

Figura 5.7. Distribución de pérdidas por distritos para el modelo Yepes y Silva (2017). ...	72
Figura 5.8. Mapa de pérdidas por barrios del cantón Central de San José para el modelo propuesto por Yepes y Silva (2017).	73
Figura 5.9. Estimación de muertes según los distintos modelos de consecuencias.....	76
Figura 5.10. Mapa con distribución de muertes esperadas por barrios utilizando el modelo de consecuencias FEMA (2020).	77
Figura 5.11. Mapa con distribución de muertes esperadas por barrios utilizando el modelo de consecuencias Miyamoto (2016).	78
Figura 5.12. Mapa con distribución de muertes esperadas por barrios utilizando el modelo de consecuencias Jaiswal y Wald (2010).	79
Figura 5.13. Mapa con distribución de muertes esperadas por barrios utilizando el modelo de consecuencias So y Pomonis (2012) y Spence (2007).....	80
Figura 5.14. Estimación de escombros según la iniciativa Miyamoto (2016) y FEMA (2020)	82
Figura 5.15. Estimación de escombros por taxonomía base agrupada según la iniciativa Miyamoto (2016) y FEMA (2020).....	83
Figura 5.16. Estimación de escombros por taxonomía base para los siete casos con mayores estimaciones según la iniciativa Miyamoto (2016) y FEMA (2020).....	84
Figura 5.17. Estimación de escombros por taxonomía para los siete mayores casos según la iniciativa Miyamoto (2016) y FEMA (2020)	84
Figura 5.18. Estimación de escombros para los siete barrios con mayores escombros esperados según la iniciativa Miyamoto (2016) y FEMA (2020).....	85
Figura 5.19. Estimación de escombros por distrito según la iniciativa Miyamoto (2016) y FEMA (2020)	86
Figura 5.20. Mapa de distribución de escombros por barrio según la iniciativa FEMA (2020).	87
Figura 5.21. Mapa de distribución de escombros por barrio según la iniciativa Miyamoto (2016).	87

Índice de cuadros

Cuadro 1.1. Principales terremotos de los últimos 40 años en Costa Rica	2
Cuadro 2.1. Estados de daño de la metodología EMS 98, HAZUS 99 y ATC-25.....	13
Cuadro 2.2. Extracto de factores de estimación de víctimas de la iniciativa HAZUS.	24
Cuadro 2.3. Factores para estimación de muertes para mampostería estructural.	26
Cuadro 2.4. Extracto de la Tabla 10-1 (Razones de unidad de peso (kg/m ²) para elementos estructurales y no estructurales por tipología constructiva) del Manual Técnico de HAZUS	27
Cuadro 2.5. Extracto de la tabla 10-2 (Factores de escombros estructurales y no estructurales debido a bloques, madera y otros, en porcentaje de peso)	27
Cuadro 2.6. Extracto de la tabla 10-3 (Factores de escombros estructurales y no estructurales debido concreto reforzado y acero, en porcentaje de peso).....	27
Cuadro 3.1. Resumen de las iniciativas identificadas para estimar pérdidas económicas ..	31
Cuadro 3.2. Comparación de factores de las iniciativas con clasificación de daño HAZUS (1999).	32
Cuadro 3.3. Comparación de factores de las iniciativas con clasificación de daño EMS 98.	33
Cuadro 3.4. Comparación de los factores propuestos por las iniciativas con clasificación de daño EMS 98 con la equivalencia a HAZUS (1999) y HAZUS (1999).....	33
Cuadro 3.5. Extracto de la tabla 11-2 (Factores de costo de reparación por daños estructurales) del Manual Técnico de HAZUS.....	35
Cuadro 3.6. Extracto de la tabla 11-3 (Factores de costo de reparación por daños no estructurales sensible a la aceleración) del Manual Técnico de HAZUS.....	35
Cuadro 3.7. Extracto de la tabla 11-4 (Factores de costo de reparación por daños no estructurales sensible a las derivas) del Manual Técnico de HAZUS.	36
Cuadro 3.8. Factores de pérdidas propuestos por Milutinovic y Trendafiloski (2003).	40
Cuadro 3.9. Resumen de información para comparar las iniciativas para estimar víctimas	41
Cuadro 3.10. Extracto de la tabla 12-8 (Razones de colapso por tipología para daño estructural completo) del Manual Técnico de HAZUS.....	42
Cuadro 3.11. Extracto de la Tabla 12-11 (Factores de estimación de víctimas por tipología para daño estructural completo, para escenario exterior) del Manual Técnico de HAZUS.	43
Cuadro 3.12. Factores de víctimas propuestos para San José.....	44

Cuadro 3.13. Factores de víctimas propuestos por So y Pomonis (2012).	45
Cuadro 3.14. Factores de víctimas propuestos por Jaiswal y Wald (2010).	46
Cuadro 3.15. Factores de víctimas propuestos por Spence (2007).	47
Cuadro 3.16. Extracto de las tipologías de la Tabla 10-1 consideradas en el caso de estudio (Razones de unidad de peso (kg/m^2) para elementos estructurales y no estructurales por tipología constructiva) del Manual Técnico de HAZUS.	49
Cuadro 3.17. Extracto de la tabla 10-2 y 10-3 (Factores de escombros estructurales y no estructurales debido a bloques, madera, concreto reforzado, acero y otros, en porcentaje de peso)	49
Cuadro 3.18. Factores para la estimación de escombros de la metodología Miyamoto (2016) aplicados en el caso de estudio	51
Cuadro 5.1. Tipologías base consideradas en el estudio.	62
Cuadro 5.2. Pérdidas económicas estimadas y relación de pérdidas con respecto al valor total del portafolio según las iniciativas consideradas	65
Cuadro 5.3. Información de la tipología CR_D_A y la iniciativa FEMA (2020) requerida por OpenQuake para generar el archivo de vulnerabilidad	74

Rodríguez Herrera, Francisco

Modelos de consecuencias y la valoración de su impacto en evaluaciones del riesgo sísmico físico

Trabajo de Graduación-Ingeniería Civil-San José. C.R.:

F Rodríguez H., 2021

Xiii, 95, [6]h; isl.col.- 44 refs

Resumen

En este trabajo de investigación se determinó el impacto de los modelos de consecuencias en una evaluación del riesgo sísmico físico determinista. Para ello se recopiló información de ocho iniciativas internacionales de estimación de riesgo sísmico enfocadas en la estimación de pérdidas económicas, cinco en estimación de víctimas y dos en escombros.

Se utiliza el programa OpenQuake de la Fundación Global Earthquake Model (GEM) para realizar los cálculos de riesgo sísmico. En el caso de la estimación de víctimas, se generan curvas de vulnerabilidad a partir de funciones de fragilidad y de consecuencias para un total de 17 tipologías constructivas. Los cálculos se enfocan en el cantón Central de San José, dando continuidad a una serie de investigaciones enfocadas en dicha región que han permitido determinar un modelo de exposición el cual es un insumo básico para las estimaciones de riesgo sísmico. Con respecto a la amenaza, se considera un escenario determinista con un evento generado por la falla de Cipreces con una magnitud de 6.0 Mw y una profundidad de 15 Km.

Se encuentra que para el caso de estudio considerado los modelos de consecuencias enfocados en pérdidas económicas tienen un alto impacto en dichas estimaciones, con diferencias de hasta $\$95$ mil millones de colones para una diferencia de 1% en los factores de pérdidas. En caso de las víctimas, se encuentran resultados con alta variabilidad también, sin embargo, en dicho caso se tienen estimaciones mediante modelos de consecuencias empíricos y semi-empíricos, por lo que se atribuye a ello dicha variabilidad. F.R.H.

MODELOS DE CONSECUENCIAS, RIESGO SÍSMICO, PÉRDIDAS ECONÓMICAS, VÍCTIMAS, ESCOMBROS, VULNERABILIDAD SÍSMICA, FRAGILIDAD, OPENQUAKE.

Ing. Luis Carlos Esquivel Salas, MSc.

Escuela de Ingeniería Civil

1 Introducción

1.1 Justificación

1.1.1 El problema específico

El ser humano por naturaleza es curioso acerca de fenómenos naturales que generan amenaza a la vida y bienes materiales, es por esta razón que a lo largo de la historia se ha dedicado a estudiar los sismos. En el caso particular del estudio de los sismos y terremotos se definieron variables que ayudaron a su comprensión como lo son la magnitud y la intensidad. La magnitud se refiere a la medida de la energía liberada por el sismo (Porter, 2020), esta se puede calcular a partir de diferentes metodologías y es un dato importante para la comprensión y estudio del fenómeno, sin embargo, dicha variable no es la que se correlaciona mejor con el daño. La intensidad describe el efecto percibido por las personas y el nivel de daño observado a las estructuras (LIS, 2011).

Los estudios de riesgo sísmico tienen como objetivo la estimación de pérdidas producto de eventos sísmicos, a diferencia de las variables comentadas anteriormente, el estudio de riesgo sísmico permite una evaluación de los daños más completa, con estimaciones de consecuencias como pérdidas económicas, víctimas y escombros (Miyamoto, 2016). Estas estimaciones tienen distintas aplicaciones, favorecen la toma de decisiones ante la presencia de una emergencia producto de un terremoto, ayudan a reducir la afectación debido a futuros eventos sísmicos conociendo las estructuras más vulnerables, y se utilizan ampliamente en las agencias de seguros.

Sin embargo, se tiene implícita una considerable incertidumbre ya que para llegar a dichos resultados se deben modelar componentes complejos como la amenaza sísmica, los activos expuestos, el desempeño esperado de dichos activos y finalmente la estimación de las pérdidas. Es por ello que se busca determinar el impacto de los modelos de consecuencias en las estimaciones de riesgo sísmico físico a través de esta investigación.

1.1.2 Importancia

Costa Rica está localizado en una zona con alta sismicidad, esta característica es debida a la presencia de tres placas tectónicas: las placas del Coco, Caribe y Nazca, además en el territorio nacional existe una extensa red de fallas locales activas (RSN, 2019) y de cuyo movimiento resultan grandes liberaciones de energía. Esa condición de alta sismicidad ha

causado múltiples pérdidas humanas y económicas en Costa Rica a lo largo de la historia, y por su naturaleza es una condición que se seguirá presentando en este país.

Los terremotos son una de las manifestaciones naturales más destructivas, los cuales, generan una importante afectación psicológica a la población (Lantada, 2007). En el Cuadro 1.1 se presenta un historial con los terremotos que han producido mayores daños y pérdidas en el territorio de Costa Rica en las últimas cuatro décadas.

Cuadro 1.1. Principales terremotos de los últimos 40 años en Costa Rica

Fecha	Magnitud (Mw)	Lugar	Efectos reportados
2 de abril de 1983	7.4	Golfito	Se informó de al menos 25 casas severamente dañadas y otras 44 con daños menores en el área entre los poblados de Sierpe, San Francisco de Tinoco y Villa Colón. Colapso de edificios. Una muerte reportada.
25 de marzo de 1990	7.3	Cóbano	Se reportaron 32 casas dañadas, ocho destruidas y 79 edificios con daños en diferentes grados. En el Puerto de Caldera, los sismos principalmente afectaron la zona del muelle y también el rompeolas sufrió daños de agrietamiento.
22 de abril de 1991	7.7	Limón	Los daños y pérdidas más notables ocurrieron en líneas vitales, incluyendo carreteras, ferrocarriles, puentes, puertos y acueductos. En Costa Rica fue necesario reconstruir 309 km de carreteras. 48 muertes en Costa Rica y 78 en Panamá. 4 452 viviendas colapsadas en y 7 869 dañadas solo en Costa Rica.

20 de agosto de 1999	6.9	Quepos	Daños en viviendas
8 de enero del 2009	6.2	Cinchona	En total se registraron 27 muertos. En Cinchona se dieron cambios importantes en la topografía y relieve, 90% de destrucción en casas, escuelas, iglesias, negocios e industrias.
5 de setiembre del 2012	7.6	Sámara	Daños materiales principalmente en la Península de Nicoya, el hospital y la Municipalidad de Puntarenas

Fuente: (RSN,2020)

Debido a que los sismos son impredecibles, los estudios de riesgo sísmico tienen una gran importancia ya que permiten estimar consecuencias como pérdidas económicas, víctimas y escombros. Los cálculos de riesgo sísmico necesitan de tres insumos básicos: 1. El modelo de exposición, 2. El modelo de amenaza y 3. El modelo de vulnerabilidad (Porter, 2020). Los modelos de consecuencias se encuentran contenidos en el tercer componente de los que se mencionaron anteriormente y su importancia radica en que permite cuantificar las pérdidas como costos de reparación de propiedad, víctimas, entre otros. Finalmente, utilizando los resultados del análisis de riesgo, se pueden tomar decisiones con respecto a políticas o planes de acción para disminuir el impacto social y económico que causarían futuros terremotos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Cuantificar y analizar el impacto que tienen los modelos de consecuencias en las evaluaciones de riesgo sísmico físico, por medio de la utilización de al menos tres modelos documentados.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Describir los modelos de consecuencias utilizados en las iniciativas para evaluaciones de riesgo sísmico HAZUS, Risk-UE y GEM.

- ii. Realizar una estimación de riesgo sísmico determinista utilizando al menos tres modelos puntuales para analizar su impacto en la estimación de las pérdidas.
- iii. Generar funciones de vulnerabilidad combinando funciones de fragilidad y funciones de consecuencias para al menos cinco funciones de fragilidad desarrolladas o utilizadas en Costa Rica.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Alcance

1.3.1.1 Alcances geográficos

La zona considerada para la estimación de riesgo sísmico corresponde al cantón de San José, incluyendo sus 11 distritos: El Carmen, Merced, Hospital, Catedral, Zapote, San Francisco de Dos Ríos, La Uruca, Mata Redonda, Pavas, Hatillo y San Sebastián.

1.3.1.2 Alcances temporales

La información de las estructuras representadas en el modelo de exposición fue recopilada entre el año 2017 y 2019, en el estudio "Estimación del riesgo sísmico en el cantón de San José, Costa Rica", publicado por Esquivel-Salas L.C. et al. (2021). Por lo que no se toma en cuenta edificaciones construidas posterior al periodo indicado.

1.3.1.3 Alcances especiales

Se realizará la investigación enfocada en tres iniciativas para valoraciones del riesgo sísmico como lo son HAZUS, Riesgo para la Unión Europea (Risk-UE) y Global Earthquake Model (GEM).

Para la evaluación de los modelos de consecuencias se utilizará únicamente el programa OpenQuake (GEM, 2020), ya que este admite tanto funciones de consecuencias como de vulnerabilidad.

La investigación se enfoca en la determinación de riesgo sísmico físico determinista y las pérdidas humanas y económicas relacionadas al daño físico.

Debido al tipo de análisis que se propone realizar para comparar los modelos de consecuencias, no se pretende determinar cuál es el que mejor estime las pérdidas para el escenario que se evalúe, sino, determinar las diferencias entre cada modelo seleccionado.

Se va a considerar el portafolio residencial para la valoración de riesgo sísmico.

1.3.2 Limitaciones

Se tienen limitaciones características de los cálculos de riesgo sísmico. Estas se producen debido a que es complejo representar las condiciones reales de una zona con relación a la amenaza, exposición y vulnerabilidad. Por ejemplo, para obtener los datos de los activos expuestos, se pueden realizar sondeos o encuestas en la zona de estudio, este proceso tiene cierto grado de incertidumbre ya que no es posible que un profesional con conocimiento del tema evalúe la condición real de cada casa o edificio por motivos de complejidad logística y de personal e inclusive legal que requiere hacer una inspección de ese tipo. De igual manera sucede con los sismos que, como se explicó anteriormente, estos por naturaleza son impredecibles, por lo que se hace al realizar estudios de riesgo sísmico es plantear uno o varios escenarios considerando amenaza sísmica (ya sea una fuente sísmica o varias). La combinación de estas variables implica que los distintos resultados de los estudios de riesgo sísmico tengan incertidumbre, sin embargo, el objetivo consiste en buscar la mejor representación posible de la realidad.

El modelo de exposición considera estructuras inalteradas, por lo que si se realizan adecuaciones sísmicas estas no se consideran, al igual que en caso de construcciones ubicadas en sitios donde se han demolido estructuras antiguas.

Con respecto a la disponibilidad de información, se tiene una limitación ya que en Costa Rica no se ha desarrollado hasta la fecha un modelo de consecuencias, por lo que para el desarrollo de este estudio se va a adoptar modelos desarrollados para otras latitudes. Lo mismo sucede con el modelo de fragilidad, ya que no se cuenta con funciones de fragilidad para todos los tipos de estructuras existentes en San José, Costa Rica, por lo que se va a adoptar curvas generadas para otras ubicaciones geográficas y que se ajusten de la mejor manera a las estructuras que se van a considerar.

1.4 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

A nivel mundial existen diferentes iniciativas dedicadas a las valoraciones de riesgo sísmico, algunas de ellas tienen un enfoque completo, es decir, estiman pérdidas económicas, víctimas y escombros, por ejemplo, HAZUS la cual es desarrollada en Estados Unidos por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA por sus siglas en inglés) (FEMA, 2013). Por otro lado, se tienen iniciativas que se enfocan en pérdidas económicas y víctimas,

por ejemplo, Riesgo para la Unión Europea (Risk-UE) desarrollada en Europa (Mouroux y Brun, 2006) y Global Earthquake Model (GEM, 2021) que es una fundación ubicada en Italia, con el objetivo a estimar pérdidas a nivel internacional. Mientras que se tienen algunas iniciativas que se enfocan ya sea en la estimación de pérdidas económicas o víctimas, cabe mencionar que no se identificó ninguna que se enfoque únicamente en estimación de escombros.

Se realizó una indagación para saber si existe algún estudio a nivel nacional o internacional que haya realizado una evaluación del impacto de modelos de consecuencias en estimaciones de riesgo sísmico, sin embargo, no se encontró ninguno con dicho enfoque. Lo más similar encontrado se trata del documento realizado por D´Ayala et al. (2014). En dicho documento se presenta una guía para analizar estructuras generando curvas de vulnerabilidad y fragilidad, sin embargo, lo más interesante para esta investigación es que se realiza una recopilación de modelos de consecuencias de pérdidas económicas, por lo que este estudio fue de ayuda para identificar algunos modelos de consecuencias.

A nivel de Costa Rica se identificaron tres estudios de riesgo sísmico. Se desarrolló el proyecto "Riesgo sísmico de San José: análisis probabilista de amenazas y riesgos naturales" realizado por la empresa Evaluación de Riesgos Naturales (ERN, 2009). Esta investigación pretende evaluar el riesgo sísmico potencial de la ciudad de San José en términos de pérdidas económicas anuales esperadas (PAE), pérdidas máximas probables (PML) y la afectación directa sobre la población. Para la evaluación del riesgo sísmico se siguió la metodología propuesta en el marco de la iniciativa CAPRA y obtienen resultados en términos de porcentaje de afectación física de las construcciones, pérdidas económicas directas aproximadas asociadas al daño en las construcciones, afectación humana en términos de pérdida de vidas, pérdidas económicas máximas probables y pérdidas anuales esperadas. Se especifica que utilizan curvas de vulnerabilidad para estimar las pérdidas, inclusive presentan dichas curvas, sin embargo, no especifican los modelos de consecuencias utilizados.

Por otro lado, uno de los principales estudios de riesgo sísmico realizados en el país corresponde al proyecto desarrollado por la empresa Miyamoto International (Miyamoto, 2016). El objetivo de este proyecto era evaluar los valores esperados de daños a los edificios del cantón de San José, pérdidas económicas, muertes (tanto para escenarios diurnos como

nocturnos) y el volumen de escombros que resultarían de un potencial terremoto. En este caso para la estimación de las pérdidas económicas y humanas utilizan los modelos de consecuencias de la iniciativa HAZUS (FEMA, 2001) y calculan un factor de modificación para Costa Rica, para este estudio se utiliza el programa OpenQuake. El algoritmo de evaluación de riesgo utiliza como parámetros de entrada: la amenaza sísmica con enfoque probabilista, datos de exposición de toda la ciudad, fragilidad del edificio para los tipos de edificios comunes y, por último, funciones de consecuencia que relacionan muertes, pérdidas económicas y volumen de escombros al estado de daño del edificio. Cabe destacar que para este estudio se modifican los valores de las pérdidas para Costa Rica, a partir de los valores de la metodología HAZUS (FEMA, 2001) que fueron desarrollados para Estados Unidos.

Otro estudio desarrollado a nivel nacional, corresponde al realizado por Calderón y Silva (2019), este estudio presenta una evaluación de vulnerabilidad y riesgo sísmico enfocado en edificaciones residenciales en Costa Rica. Como parte de este, se desarrollan funciones de fragilidad para las clases de edificios más comunes y se combinan con funciones existentes derivadas para la evaluación de riesgos en América del Sur, se utiliza el programa OpenQuake y se obtiene información como pérdidas promedio anualizadas a escala nacional, desglosadas por clase de edificio y regiones administrativas. En esta investigación se generaron funciones de vulnerabilidad combinando funciones de fragilidad con funciones de consecuencias, la información de estas se encuentra disponible en la página web de la plataforma OpenQuake. Acerca del modelo de consecuencias utilizado, se trata de una propuesta de Yepes-Estrada y Silva (2017), que se definió a partir de una serie de propuestas para Portugal, Grecia, Italia, Turquía y California.

1.5 Metodología

La metodología seguida para la elaboración del Trabajo Final de Graduación se muestra en la Figura 1.1.

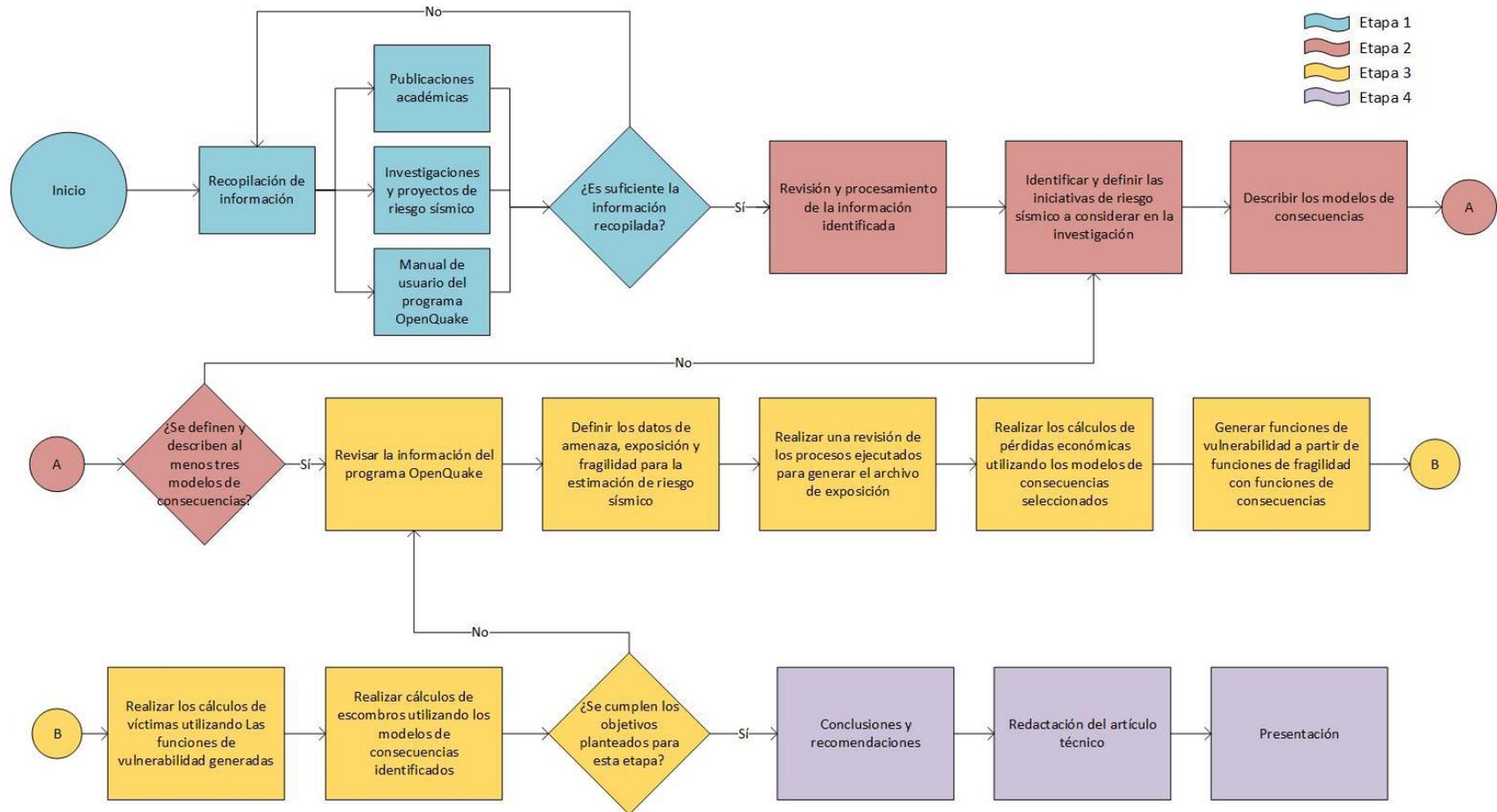


Figura 1.1. Diagrama de flujo de la metodología.

Como se aprecia en el diagrama de flujo de la metodología, se contó con cuatro etapas para el desarrollo de esta investigación. En la etapa uno se realizó a la recopilación de bibliografía, esta etapa es importante ya que ayudó a tener un panorama claro del conocimiento que se tiene a tanto a nivel nacional como mundial, y también las investigaciones relacionadas a este tema que se han desarrollado y pueden aportar conocimiento valioso.

Posteriormente se tiene la etapa dos, el objetivo de esta consistió en la definición y descripción de las principales metodologías de riesgo sísmico y los modelos de consecuencias considerados en estas para estimar tanto pérdidas económicas, víctimas (muertes y lesiones) y escombros. Para lograrlo se realizó una revisión bibliográfica tanto para las iniciativas consideradas como publicaciones académicas que presenten otros modelos de consecuencias. Se describe el tipo de pérdidas estimada por cada iniciativa, las tipologías constructivas consideradas, el país o región para la cual fue desarrollado, la clasificación de daño considerada y el tipo de metodología (analítica, empírica o semi-empírica).

La etapa tres abarcó la estimación de riesgo sísmico utilizando la metodología de GEM, variando el modelo de consecuencias para cuantificar la variabilidad de estos. En esta etapa primeramente se realizó una revisión bibliográfica del manual técnico del programa OpenQuake (GEM, 2020) con el objetivo de conocer la información solicitada por el programa, el proceso de cálculo del riesgo sísmico y la información de salida. Posteriormente se procedió a definir los datos de amenaza, exposición y fragilidad necesarios para la estimación de riesgo sísmico, y realizando la revisión de los distintos procedimientos llevados a cabo para generar el archivo del modelo de exposición. Seguidamente, se realizó el cálculo determinista del riesgo sísmico físico para estimar pérdidas económicas, esto consistió en hacer cálculos de riesgo sísmico con valores de entrada constantes variando el modelo de consecuencias, esto para evaluar las pérdidas económicas obtenidas asociadas a los diferentes modelos y comparar los resultados.

Seguido a ello se investigó la metodología GEM para generar curvas de vulnerabilidad a partir de la combinación de funciones de fragilidad y de consecuencias, y una vez que se determinó la forma de hacerlo se procedió a ello generando curvas de vulnerabilidad para las 17 tipologías constructivas, aplicando las distintas funciones de consecuencias identificadas para estimar víctimas, luego de ello, para cada iniciativa se generó el archivo

de configuración requerido por el programa OpenQuake y se procedió a realizar los cálculos de estimación de víctimas. Esta etapa finalizó con el cálculo de escombros para las iniciativas identificadas para ello.

Finalmente se presenta la etapa cuatro, en esta se llevó a cabo la redacción del informe técnico, conclusiones y recomendaciones, la redacción de un artículo técnico y la presentación de los principales resultados de la investigación.

2 Marco teórico

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos necesarios para comprender el papel de los modelos de consecuencias en los estudios de riesgo sísmico, así como otras variables necesarias para obtener las estimaciones deseadas y conceptos básicos relacionados a los procedimientos que se llevan a cabo en las estimaciones de riesgo sísmico.

2.1 Riesgo sísmico

Es la probabilidad de que se produzca un resultado indeseable producto de un evento sísmico. Para la evaluación del riesgo sísmico se consideran tres parámetros básicos, los cuales son: exposición, amenaza y vulnerabilidad. La variable de exposición representa la descripción de los activos expuestos que se ven afectados ante el evento sísmico, que considera la ubicación geográfica, el sistema resistente a cargas laterales, materiales, entre otras variables consideradas para cada uno de dichos activos. La amenaza corresponde a la probabilidad de que se presente un evento sísmico de cierta intensidad que afecte a la estructura. La vulnerabilidad corresponde a la probabilidad de que la estructura sufra cierto nivel de daño y la estimación de consecuencias asociadas a la estructura según la amenaza considerada (Porter, 2020).

2.2 Amenaza sísmica

Primeramente, UNISDR (2009) define la amenaza como “un fenómeno peligroso o condición que puede causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, daños a la propiedad, pérdida de medios de vida y servicios, trastornos sociales y económicos, o daño ambiental”.

La amenaza sísmica se define como la probabilidad de que se presente una liberación de energía producto de un sismo en un lugar determinado (Climent et al., 2008). Para caracterizar esta variable se debe definir como mínimo una fuente sísmica (ubicación) y la magnitud o potencial sísmico de la fuente. Posteriormente se debe estimar el efecto de dicha amenaza en las estructuras expuestas, considerando la distancia, condiciones geológicas y geotécnicas, entre otras condiciones, para ello se utilizan modelos de atenuación o software especializados para dichos cálculos.

En estudios de riesgo sísmico la amenaza se puede representar de dos maneras. La primera es con un enfoque probabilista, en este caso se consideran muchos eventos sísmicos. La

segunda es con un enfoque determinista, en este caso se considera un único evento específico generado por una fuente sísmica puntual, con una magnitud, características geológicas y geotécnicas definidas para dicho escenario. El escenario probabilista permite obtener resultados relacionados con pérdidas anuales esperadas para las estructuras expuestas, mientras que el determinista permite obtener la pérdida esperada dada la eventual ocurrencia del evento seleccionado (ERN, 2009).

Existen distintos términos relacionados a la amenaza sísmica, como lo es la magnitud y la intensidad, estos se definen a continuación.

2.2.1 Magnitud sísmica

Según Porter (2020), la magnitud sísmica es una medida de la cantidad de energía liberada por un evento sísmico y se mide mediante sismógrafos. Existen diferentes escalas de medida como lo son: la escala de magnitud local (ML) (Gutenberg y Richter, 1936), la escala de magnitud superficie-ondas (MS) (Gutenberg, 1945) y la escala sismológica de magnitud de momento (MW) (Hanks, C y Kanamori, H. (1979).

2.2.2 Intensidad sísmica

La intensidad describe el efecto percibido por las personas y el nivel de daño observado a las estructuras (LIS, 2011). Según Porter (2020) las medidas de intensidad sísmica pueden ser: el valor de aceleración máxima del terreno (PGA) que se mide en unidades de aceleración como fracción de la gravedad o gales (por ejemplo: 0.4g, 393.2 gal), el desplazamiento espectral (Sd) que se mide en unidades lineales comunmente en centímetros, la aceleración espectral (Sa) que se mide igual que la aceleración máxima del terreno (PGA) o la velocidad máxima del terreno (PGV) que se mide en unidades de velocidad, comunmente en cm/s.

2.3 Fragilidad

2.3.1 Estados de daño

Los estados de daño son una herramienta desarrollada para describir el daño de las estructuras tanto cualitativamente como cuantitativamente. Esto es importante ya que las funciones de fragilidad se forman a partir de matrices de probabilidad de daño, en estas matrices cada elemento de la matriz representa la probabilidad de que suceda un estado de daño para una determinada intensidad. Por lo tanto, estos estados de daño definen los

límites del comportamiento esperado de la estructura ante la medida de intensidad sísmica (Pujades y Barbat, 2004).

Existen distintas metodologías que han definido estados de daño, las principales son: Consejo de Tecnología Aplicada (1985 y 1991) más conocido como ATC-13 (1985) y ATC-25 (1991) por sus siglas en inglés, la Escala Macrosísmica Europea (1998) conocida como EMS-98, y HAZUS (1999). Se presentan a continuación la descripción de clasificación de daño ATC-25, EMS-98 y HAZUS (1999).

Cuadro 2.1. Estados de daño de la metodología EMS 98, HAZUS 99 y ATC-25.

ATC-25	EMS 98	HAZUS (1999)	Descripción del grado o estado de daño
Sin daño	DS0- Sin daño	Sin daño	Sin daño
Daño ligero (Light)	DS1- Daño entre insignificante y leve. (Negligible to slight damage)	Daño ligero (Slight)	Daño insignificante, limitado y localizado, que no necesita reparación.
Daño moderado (Moderate)	DS2-Daño moderado (Moderate)	Daño moderado (Moderate)	Daño localizado significativo de algunos elementos que requieren reparación.
Severo (Heavy)	DS3 Daño entre sustancial y severo (Substantial to heavy damage)	Extensivo (Extensive)	Daño generalizado (extensive) que requiere reparaciones importantes
	DS4 Daño muy severo (Very heavy damage)		Daño importante y general que puede causar que el edificio quede

Entre extensivo y colapso (Major to destroyed)		Completo (Complete)	devastado, de forma que requiera ser demolido o totalmente reparado.
	DS5 Destrucción (Destruction)		Total destrucción de la mayor parte del edificio.

Fuente: Lantada (2007).

Como se puede apreciar en el Cuadro 2.1, la clasificación de daño EMS-98 cuenta con cinco estados de daño además de la clasificación "sin daño", mientras que en el caso de ATC-25 y HAZUS (1999) cuentan con cuatro estados de daño además de la clasificación "sin daño".

2.3.2 Función de Fragilidad

Una función de fragilidad se define como la relación que describe la probabilidad de que ocurra un suceso indeseable. Aplicada a riesgo sísmico, la función o curva de fragilidad describe la probabilidad de que la estructura alcance o exceda cierto nivel de daño ante el efecto de un evento sísmico (Porter, 2020). Existe también el término modelo de fragilidad, en este caso, se refiere al conjunto de funciones de fragilidad que representan el comportamiento de las distintas tipologías presentes en el estudio (GEM,2020).

Para determinar la fragilidad de una estructura se consideran distintas variables dependiendo del nivel de detalle que se busque. Por ejemplo, en estudios extensivos la iniciativa HAZUS propone simplificar la representación de estructuras clasificándolas por material y tipo de construcción: mampostería con o sin refuerzo, concreto reforzado, marcos de acero, estructuras livianas no diseñadas, entre otras (Miyamoto, 2016). Con respecto a las consideraciones a tomar en cuenta para determinar la respuesta estructural de la estructura, D'ayala et al. (2014), definen que además de los elementos estructurales, se debe considerar elementos no estructurales que afecten el comportamiento de la estructura, por ejemplo, paredes de mampostería en edificios de concreto reforzado.

Matemáticamente, las funciones de fragilidad se suelen representar mediante una distribución probabilística normal acumulada mediante la ecuación [1] (Calderón, 2018):

$$P[ds/IM] = \phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{IM}{IM_{ds}} \right) \right] \quad [1]$$

Donde:

IM_{ds} : Valor medio de a medida de intensidad sísmica (IM) en el que la estructura alcanza el umbral de daño D_s

β_{ds} : Desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral

IM : Medida de intensidad sísmica

ϕ : Función de distribución normal estándar acumulada

En la Figura 2.1 se puede observar una curva de fragilidad típica: en el eje Y se tiene la probabilidad de excedencia la cual varía entre cero y uno, mientras que en el eje X se tiene la medida de intensidad sísmica, en este caso desplazamiento espectral. Se observa que se cuenta con cuatro curvas las cuales describen los cinco estados de daño considerados, que son: Sin daño, leve, moderado, severo y completo. Además, se observa que conforme mayor es el desplazamiento espectral, aumenta la probabilidad de que se presenten estados de daño como el moderado, severo y completo. Por ejemplo, para el desplazamiento espectral S_d indicado en el gráfico, la probabilidad aproximada $P(0)=3\%$, $P(1)=20\%$, $P(2)=45\%$, $P(3)=27\%$ y $P(4)=5\%$. Mientras que para el desplazamiento espectral S_{d4} , la probabilidad aproximada $P_4(0)=0\%$, $P_4(1)=3\%$, $P_4(2)=15\%$, $P_4(3)=32\%$ y $P_4(4)=50\%$.

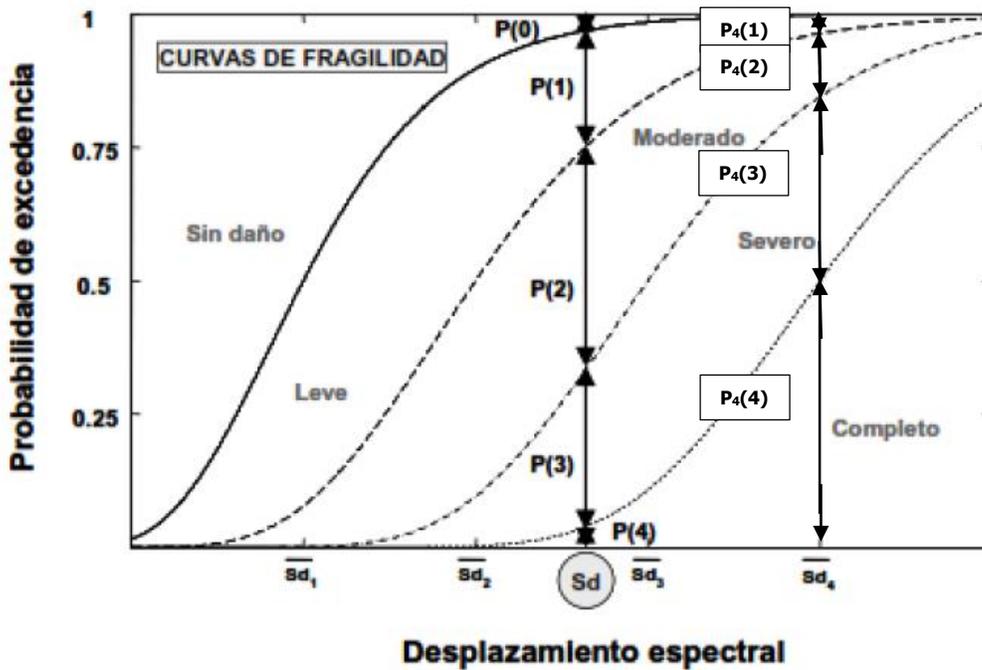


Figura 2.1. Ejemplo de curva de fragilidad

Fuente: (Lantada, 2007)

2.4 Vulnerabilidad

2.4.1 Pérdidas

Se entiende por pérdidas causadas por terremotos los resultados indeseables a causa de estos. Se clasifican principalmente en tres grupos: 1. Las pérdidas económicas, que incluyen costo de reparación, costo de reposición, pérdida de inventario, pérdida de funcionalidad, entre otras, 2. Las víctimas que incluye lesiones, muertes y damnificados, y 3. Las estimaciones de escombros (Porter, 2020).

Las pérdidas económicas se pueden desglosar por pérdidas estructurales y no estructurales. La pérdida estructural se refiere a todos los elementos que forman parte del sistema estructural de la edificación como columnas, vigas, muros, techos. Las pérdidas no estructurales pueden a su vez clasificarse en pérdidas no estructurales sensibles a la aceleración (por ejemplo: daño a cielos, tuberías, equipo eléctrico y mecánico y elevadores) y pérdidas no estructurales sensibles a las derivas (por ejemplo: particiones, paredes exteriores, decoraciones y vidrio) (FEMA, 2020).

2.4.2 Costo de reposición

Se asocia al costo de construir nuevamente el edificio cuando los daños son muy extensivos y no es posible realizar la reparación de los distintos elementos. El cálculo debe tomar en cuenta factores como: mano de obra, materiales, equipo requerido, entre otros. Es usual que se utilicen datos de costos de construcción unitarios por tipología para estimar el costo asociado a cada tipo de estructura. El nivel de detalle en el cálculo del costo de reposición depende directamente del alcance del estudio de riesgo, ya que al analizar muchas y diferentes estructuras se requiere gran cantidad de información, la cual generalmente no se encuentra disponible por lo que se deben adoptar simplificaciones. También se conoce como costo de reemplazo.

2.4.3 Costo de reparación

Consiste en el cálculo del costo económico de los diferentes elementos de las estructuras que se ven afectadas por el evento sísmico en este caso. Es usual que el costo de reparación se estime a partir del costo de reposición para los estados de daño más leves que el daño completo. Para esto se utilizan modelos de consecuencias enfocados en pérdidas económicas.

Por ejemplo, para una estructura con un costo reposición de ₡15 000 000 y un daño moderado, considerando el modelo de consecuencias propuesto por FEMA (2020), el cual se puede observar en el Cuadro 3.2, se propone un factor de pérdidas del 10% para dicho estado de daño, por lo tanto el costo de reparación estimado sería ₡1 500 000.

2.4.4 Función de vulnerabilidad

La función de vulnerabilidad describe la pérdida esperada de la estructura ante el efecto de un evento sísmico (Porter, 2020). Como se ha mencionado anteriormente, dicha pérdida se puede tratar de pérdidas económicas (razón de costo de reparación/costo de reposición, ver Figura 2.2), víctimas (razón de ocupantes fallecidos/ocupantes totales de la edificación) o escombros (volumen de escombros/área de construcción). Por lo tanto, existen dos maneras de medir el impacto asociado a un evento sísmico, si se mide como probabilidad de excedencia de un estado de daño se trata de fragilidad, mientras que si se mide como una pérdida se trata de vulnerabilidad.

Las funciones de vulnerabilidad se generan a partir de la combinación de funciones de fragilidad y de consecuencias, por lo que se debe obtener el mismo resultado al aplicar un

cálculo con funciones de fragilidad y de consecuencias o con funciones de vulnerabilidad. La diferencia entre funciones de consecuencias y vulnerabilidad es que las primeras estiman pérdidas a partir de un estado de daño que se obtiene de una función de fragilidad, mientras que las funciones de vulnerabilidad estiman directamente las pérdidas a partir de una medida de intensidad (Pitilakis et al., 2014).

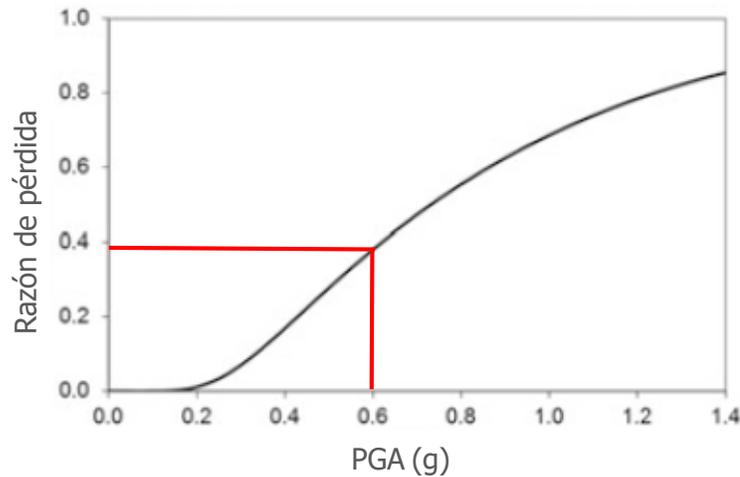


Figura 2.2. Ejemplo de una curva de vulnerabilidad

Fuente: Pitilakis et al. (2014)

A partir de la Figura 2.2 se interpreta que: para una intensidad de 0.6g, se espera una razón de pérdidas económicas de aproximadamente 0.4, lo cual equivale a un 40% del costo de reposición de dicha estructura.

2.5 Consecuencias

Se entiende por consecuencias a la variable que estima pérdidas como parte de los estudios de riesgo sísmico, estas incluyen las pérdidas económicas, víctimas y escombros. Y se representan mediante modelos de consecuencias.

Un modelo de consecuencias consiste en un conjunto de funciones o factores de pérdidas que estiman la probabilidad de que se presenten pérdidas económicas, víctimas o escombros dado un determinado nivel de daño en una estructura. Es decir, como parte de una estimación de riesgo sísmico al considerar las variables de exposición y amenaza se estima el nivel de daño de la estructura mediante funciones de fragilidad, y al utilizar esa

información en una función de consecuencias se puede estimar la probabilidad de pérdidas asociadas al nivel de daño estimado previamente Pagani et al. (2013).

Los modelos de consecuencias se derivan mediante tres metodologías dependiendo de su complejidad y consideraciones científicas utilizadas para generar los mismos. Estas se presentan a continuación.

2.5.1 Metodologías para desarrollar modelos de consecuencias.

Existen tres metodologías distintas para desarrollar modelos de consecuencias. Cada método tiene desarrollos matemáticos distintos, siendo los empíricos los que requieren menor cantidad de información para su cálculo, mientras que los analíticos son más elaborados en ese sentido.

Como se muestra en la Figura 2.3, se puede clasificar el uso de cada metodología según el resultado que se obtiene con cada una de ellas. Las metodologías empíricas se han utilizado principalmente para estimar muertes, mientras que las metodologías analíticas para estimar impacto económico y las semi-empíricas similar a las empíricas, pero incorporando más cantidad de información.

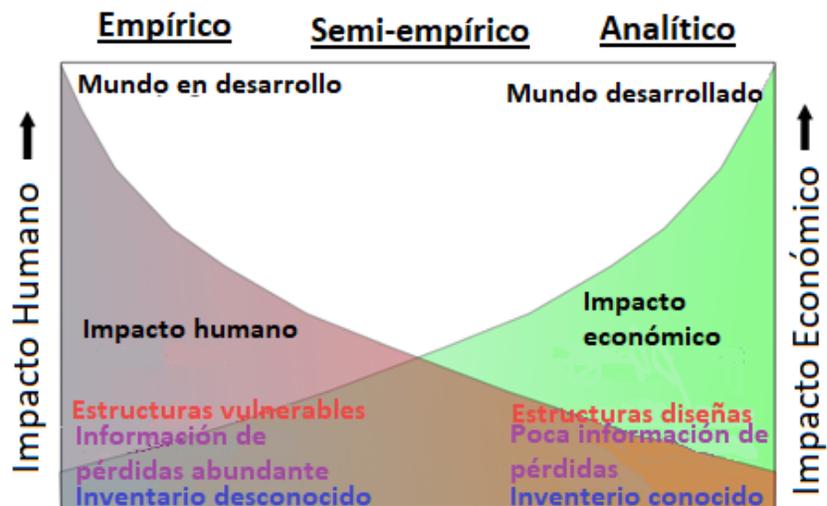


Figura 2.3. Enfoque de cada tipo de metodología de desarrollo de modelos de consecuencias.

Fuente: Bal et al. (2008). Modificado por Rodríguez (2022).

2.5.1.1 Métodos empíricos

Según Bal et al. (2008) la estimación se realiza utilizando una tasa de letalidad por país definida en términos de muertes por número de personas expuestas para cada nivel de intensidad. Para cada país k , el número total estimado de muertes se puede calcular para un terremoto "j" sumando la población expuesta en cada nivel de intensidad y luego multiplicando por la tasa de letalidad para ese nivel de intensidad:

$$E_j = \sum_{i=1}^n v_{i,j} y_k(s_i) \varepsilon_k \quad [2]$$

Dónde:

$v_{i,j}$ es la exposición de la población en la celda de la cuadrícula i

s_i es la intensidad en la celda de la cuadrícula i

$y_k(s_i)$ es la razón de fatalidad del país "k" para la intensidad "s"

ε_k es un error residual obtenido para cada país al hacer una predicción de sus pérdidas pasadas por terremotos.

2.5.1.2 Métodos semi-empíricos

En el enfoque semi-empírico, se considera el comportamiento de cada tipo de estructura, este se representa mediante funciones similares a las de fragilidad, aunque no son derivadas mediante conocimiento ingenieril, sino, por observaciones de eventos pasados y criterio de expertos. Su aplicación principalmente corresponde a estimación de muertes, se utiliza una tasa de letalidad para distintos escenarios (si la estructura colapsa o para distintos estados de daño). Cabe destacar que en este enfoque es común que solamente se establezca el colapso de la estructura asociado a una determinada medida de intensidad sísmica y a partir de esa información, se estiman las víctimas, por lo que su aplicación no suele ser la estimación de pérdidas económicas.

Para cada país k , las muertes se estiman distribuyendo la población de un área determinada (celdas de la cuadrícula) en diferentes tipos de estructura utilizando el conocimiento de las distribuciones de inventario de edificios y su patrón de ocupación, y luego analizando la vulnerabilidad de la estructura específica para calcular las muertes por terremotos. El análisis de fragilidad consiste en calcular el número de estructuras colapsadas para cada tipología

expuesta a la intensidad en esa celda y multiplicar por la tasa de mortalidad por colapso de ese tipo de estructura. El número total estimado de muertes por terremoto j en el país k es entonces:

$$E_j = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m v_{i,j,t} c_t(s_i) f_t \varepsilon_k \quad [3]$$

Dónde:

$v_{i,j,k}$ es la exposición de la población a un terremoto j en la tipología estructural t de celda de cuadrícula i

$c_t(s_i)$ es la tasa de colapso de la tipología t asociada a la intensidad en la celda de la cuadrícula i

f_t es la tasa de fatalidades dado el colapso de la estructura de la tipología t

n y m son el número de celdas y estructuras, respectivamente

ε_k se refiere al error residual, este se obtiene para cada país mediante la predicción de las pérdidas por terremotos pasados

2.5.1.3 Métodos analíticos

Son similares a los métodos semi-empíricos, a diferencia de que, en este caso, las funciones de fragilidad que representan el comportamiento de las estructuras son derivadas a partir de consideraciones de ingeniería. Dado que las únicas diferencias con el modelo semi-empírico son las funciones de fragilidad, el modelo directo para el enfoque analítico se puede formular de manera similar al modelo semi-empírico de la ecuación [3].

Por otro lado, existen diferentes metodologías de estimación de riesgo sísmico que han desarrollado modelos de consecuencias para estimar pérdidas. Algunas de ellas han estudiado tanto la estimación de las pérdidas económicas como las víctimas, por ejemplo, FEMA (2020). Mientras que algunas otras se han enfocado en un tipo de pérdida específicamente, por ejemplo, Bal et al. (2008) se enfoca en pérdidas económicas, mientras que So y Pomonis (2012) tiene un enfoque en la estimación de víctimas en estructuras de mampostería colapsadas.

2.5.2 Pérdidas económicas

La estimación de pérdidas económicas se realiza siguiendo el procedimiento presentado a continuación:

1. Estimación de la probabilidad de daño utilizando las funciones de fragilidad. En este punto es posible conocer los daños esperados para la tipología constructiva que se esté analizando a partir de una medida de intensidad sísmica, por lo que es posible estimar la cantidad de edificios que tendrán cada estado de daño definido. Se presenta un ejemplo de cálculo a continuación, para los datos presentados en la Figura 2.4.

	Estados de daño					P.Total
	Gd0	Gd1	Gd2	Gd3	Gd4	
$P(D = Gdi/Sd)$	0.0704	0.1345	0.3872	0.3523	0.0556	1
$P(D \geq Gdi/Sd)$	1	0.9296	0.7951	0.4079	0.0556	

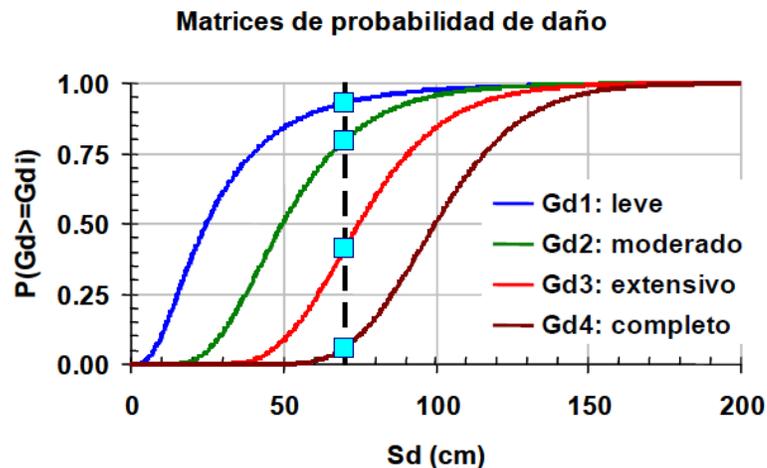


Figura 2.4. Ejemplo de curva de fragilidad.

Fuente: Pujades y Barbat (2004).

2. Para la curva de fragilidad presentada, se puede interpretar que, de cada 100 estructuras de esa tipología constructiva y para dicha intensidad, se espera que aproximadamente 7 no sufran daños, 13 presenten daños leves, 39 daños moderados, 35 daños extensivos y 6 daño completo para un desplazamiento espectral de 70 cm.
3. Para cada tipología constructiva se debe conocer o definir un área de construcción, para posteriormente estimar el costo de reemplazo de la estructura multiplicando esa área por un costo unitario de construcción. Por ejemplo, en Costa Rica se utiliza el costo

unitario del Manual de valores base unitarios por tipología constructiva (Ministerio de Hacienda, 2019).

4. Una vez que se conoce el costo de reemplazo de cada estructura se utiliza la función de consecuencias para estimar el costo de reparación. Este cálculo consiste en aplicar el factor de pérdidas asociado al estado de daño de la estructura.
5. Finalmente, las pérdidas económicas totales esperadas para la tipología constructiva corresponden a la suma del costo estimado para cada estado de daño.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de pérdidas económicas con los datos de la Figura 2.4:

Considerando 100 estructuras de dicha tipología, y una amenaza que provoque un desplazamiento espectral de 70 cm, se indicó anteriormente la distribución de daño esperado.

Ahora, se va a asignar un área constructiva de 100 m² a cada estructura, y un valor unitario de \$230 000/m². Por lo tanto, se obtiene que cada estructura tiene un valor de \$23 000 000.

Seguidamente, se debe definir un modelo de consecuencias que describa la razón de pérdidas para los distintos estados de daño, para este ejemplo se va utilizar el modelo de consecuencias propuesto por FEMA (2020), este se puede observar en el Cuadro 3.2. Para estimar las pérdidas económicas se sigue la ecuación [4] presentada a continuación.

$$PE = FD_{leve} * A * V_A + FD_{moderado} * B * V_B + FD_{extensivo} * C * V_C + FD_{completo} * D * V_D \quad [4]$$

Donde:

PE: Estimación de pérdidas económicas

FD_{leve} : Factor propuesto para el estado de daño leve.

A: Cantidad de estructuras con estado de daño leve.

V_A : Valor de cada estructura con daño leve.

$FD_{moderado}$: Factor propuesto para el estado de daño moderado.

B: Cantidad de estructuras con estado de daño moderado.

V_B : Valor de cada estructura con daño moderado.

$FD_{extensivo}$: Factor propuesto para el estado de daño extensivo.

C: Cantidad de estructuras con estado de daño extensivo.

V_C : Valor de cada estructura con daño extensivo.

$FD_{completo}$: Factor propuesto para el estado de daño completo.

D: Cantidad de estructuras con estado de daño completo.

V_D : Valor de cada estructura con daño completo

Entonces, se tiene que:

$$PE = 0.02 * 13 * 23 \times 10^6 + 0.1 * 39 * 23 \times 10^6 + 0.5 * 35 * 23 \times 10^6 + 1 * 6 * 23 \times 10^6$$

$$PE = \text{€}636\,180\,000$$

Con lo cual se determina que, para este ejemplo, las pérdidas económicas estimadas corresponden a €636 180 000 de un inventario con un valor total de €2 300 000 000.

2.5.3 Víctimas

Si se trata de una metodología analítica o semi-empírica, funciona de manera similar a los modelos de consecuencias para estimar pérdidas económicas anteriormente presentados. Los modelos de consecuencias para estimar víctimas parten de la información obtenida de las funciones de fragilidad y estiman las lesiones y muertes utilizando factores a partir de cada estado de daño. Cabe destacar que en la estimación de víctimas es sumamente importante diferenciar si la estructura colapsa, pues se tiene evidencia de que este factor es determinante en este caso.

Por ejemplo, se presenta un cuadro resumen de la iniciativa HAZUS:

Cuadro 2.2. Extracto de factores de estimación de víctimas de la iniciativa HAZUS.

No	Tipología	Severidad de la lesión (%)			
		Severidad 1	Severidad 2	Severidad 3	Severidad 4
1	W1	40	20	3	5
2	W2	40	20	5	10

Fuente: FEMA (2020). Modificado por Rodríguez (2022).

En el cuadro anterior se presentan los factores de lesiones y muertes de ocupantes de estructuras según la iniciativa HAZUS para el escenario "Estado de daño completo con

colapso de estructuras". En la segunda columna se tiene el código asignado a cada tipología constructiva considerada y en las siguientes columnas (3-6) se tiene el factor de lesiones esperadas según severidad en el siguiente orden: Severidad 1: Lesiones leves que requieren atención médica básica, Severidad 2: Lesiones considerables que requieren atención médica como rayos x u operaciones, Severidad 3: Lesiones que requieren atención médica inmediata y adecuada debido al inminente peligro que representan, Severidad 4: Muerte instantánea o herido de muerte. De igual manera, se ha desarrollado un cuadro similar al presentado para cada estado de daño (ligero, moderado, extensivo, completo sin colapso y completo con colapso).

A continuación se presenta un ejemplo de la aplicación de los factores presentados en el Cuadro 2.2. Para el mismo se va a considerar la tipología W2, la cual es una edificación de madera de 2 niveles, como se menciona en el párrafo anterior. Dicho cuadro se enfoca en un estado de daño completo con colapso, por lo que se trata de un caso extremo, sin embargo, dicha iniciativa propone factores para los cuatro estados de daño de la metodología HAZUS (1999). Como se ha mencionado anteriormente, en la estimación de víctimas es importante definir si el escenario modelado es diurno o nocturno, en este caso se va a considerar un caso diurno con 20 ocupantes en dicha estructura. Por lo tanto, al aplicar los factores las estimaciones serían:

Heridos de severidad 1= $20 \times 40\% = 8$ personas.

Heridos de severidad 2= $20 \times 20\% = 4$ personas.

Heridos de severidad 3= $20 \times 5\% = 1$ persona.

Heridos de severidad 4= $20 \times 10\% = 2$ personas.

Por otra parte, se tienen modelos empíricos que no estiman las víctimas a partir de estados de daño, sino, estos se desarrollan a partir de la información recopilada de eventos sísmicos pasados y establecen los factores directamente por tipología constructiva, aunque estos suelen estimar únicamente muertes. Por ejemplo, en el Cuadro 2.3 se muestran los factores sugeridos por la iniciativa desarrollada por So y Pomonis (2012) para mampostería estructural.

Cuadro 2.3. Factores para estimación de muertes para mampostería estructural.

Estructura	Razones de muertes (% muertes/ocupantes)	Terremoto de referencia
Mampostería estructural (baja altura)	6-8%	Italia 1970-1990s
Mampostería estructural (4- 7 niveles)	13-16%	Italia 1970-1990s
Mampostería confinada	2%	Chile 2011
Mampostería confinada de baja calidad	30%	Haiti 2010

Fuente: So y Pomonis, 2012.

2.5.4 Escombros

La estimación de escombros es un tema que se ha investigado en menor medida que las pérdidas económicas y víctimas. Sin embargo, es un dato de gran interés ya que los escombros podrían bloquear el tránsito vehicular lo cual es sumamente importante en caso de una emergencia como lo sería un terremoto.

Por otro lado, estimar la cantidad de escombros puede agilizar en gran medida la toma de decisiones con relación al equipo requerido para la recolección, acarreo y disposición de los escombros, así también como el sitio en el cual se deben depositar.

Un país que tiene amplia experiencia en el manejo de escombros debido a terremotos es Nepal, sobre todo después del terremoto de 2015 con una magnitud 7.8 Mw el cual dañó una cantidad importante de edificaciones y se generó una cantidad de escombros estimada de 362000 m³, lo que equivale a llenar 107 piscinas olímpicas. Según Khanal et al. (2021), la mayor parte de los escombros de una casa colapsada pueden reutilizarse para construir albergues, muros de contención, para rellenos en el mar (islas artificiales, muelles) o tierra (terrenos irregulares), lo cual tiene impactos positivos desde un punto de vista financiero y ambiental, y en los primeros casos mencionados, se avanza al proceso de reconstrucción. Además, se menciona que, si se cuenta con un plan para el manejo de escombros y equipo para el reciclaje de los mismos, se podría reutilizar entre un 80 y 90% de los escombros totales.

En HAZUS (2020) se considera una metodología empírica para dicha estimación. El proceso de estimación involucra dos cálculos intermedios, primeramente, se utiliza los factores del Cuadro 2.4 para estimar el peso de los distintos elementos de la estructura en toneladas cortas¹, seguidamente se estima el porcentaje de escombros (Cuadro 2.5 y Cuadro 2.6) esperado para cada una de las clasificaciones y considerando los estados de daño HAZUS (1999).

Cuadro 2.4. Extracto de la Tabla 10-1 (Razones de unidad de peso (kg/m²) para elementos estructurales y no estructurales por tipología constructiva) del Manual Técnico de HAZUS

#	Tipología	Ladrillo, madera y otros		Concreto reforzado y acero	
		Estructural	No estructural	Estructural	No estructural
1	W1	63.47	118.16	146.47	0.00

Fuente: FEMA (2020), modificado por Rodríguez (2022)

Cuadro 2.5. Extracto de la tabla 10-2 (Factores de escombros estructurales y no estructurales debido a bloques, madera y otros, en porcentaje de peso)

#	Tipología	Estado de daño estructural				Estado de daño no estructural			
		Ligero	Moderado	Extensivo	Completo	Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
1	W1	0	5	34	100	2	8	35	100

Fuente: FEMA (2020), modificado por Rodríguez (2022)

Cuadro 2.6. Extracto de la tabla 10-3 (Factores de escombros estructurales y no estructurales debido concreto reforzado y acero, en porcentaje de peso)

#	Tipología	Estado de daño estructural				Estado de daño no estructural			
		Ligero	Moderado	Extensivo	Completo	Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
1	W1	0	3	27	100	0	0	0	100

Fuente: FEMA (2020), modificado por Rodríguez (2022)

1. Toneladas cortas es una medida de masa utilizada principalmente en Estados Unidos. Una unidad equivale a 2000 lb (907.185 kg)

A continuación, se presenta dos ejemplos de cálculo de escombros, uno correspondiente a daño completo y otro a daño extensivo.

En el caso de estado de daño completo se va a considerar una estructura de madera de baja altura (W1), la misma con un área de construcción de 100 m². Entonces la estimación se realiza de la siguiente manera:

$$D_{B,W,O(S)} = 63.47 \text{ kg/m}^2 * 100\text{m}^2 * 100\% = 6\,347 \text{ kg}$$

$$D_{B,W,O(NS)} = 118.16 \text{ kg/m}^2 * 100\text{m}^2 * 100\% = 11\,816 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} D_{RC,S(S)} &= 146.47 \text{ kg/m}^2 * 100\text{m}^2 * 100\% = 14\,647 \text{ kg} \\ D_{RC,S(NS)} &= 0.0 \text{ kg/m}^2 * 100\text{m}^2 * 100\% = 0.00 \text{ kg} \end{aligned}$$

Ahora, el total de escombros para dicha estructura corresponde a:

$$D_{Total} = D_{B,W,O(S)} + D_{B,W,O(NS)} + D_{RC,S(S)} + D_{RC,S(NS)}$$

$$D_{Total} = 32\,810 \text{ kg}$$

Donde:

$D_{B,W,O(S)}$: Escombros debido a componentes estructurales de ladrillos, madera y otros.

$D_{B,W,O(NS)}$: Escombros debido a componentes no estructurales de ladrillos, madera y otros.

$D_{RC,S(S)}$: Escombros debido a componentes estructurales de concreto reforzado y acero.

$D_{RC,S(NS)}$: Escombros debido a componentes no estructurales de concreto reforzado y acero.

En el caso de estado de daño extensivo se va a considerar una estructura de madera de baja altura (W1), la misma con un área de construcción de 100 m². Entonces la estimación se realiza de la siguiente manera:

$$D_{B,W,O(S)} = 63.47 \text{ kg/m}^2 * 100\text{m}^2 * 34\% = 2\,158.05 \text{ kg}$$

$$D_{B,W,O(NS)} = 118.16 \text{ kg/m}^2 * 100\text{m}^2 * 35\% = 4\,135.45 \text{ kg}$$

$$D_{RC,S(S)} = 146.47 \text{ kg/m}^2 * 100\text{m}^2 * 27\% = 3\,954.80 \text{ kg}$$

$$D_{RC,S(NS)} = 0.0 \text{ kg/m}^2 * 100\text{m}^2 * 0\% = 0.00 \text{ kg}$$

Ahora, el total de escombros para dicha estructura corresponde a:

$$D_{Total} = D_{B,W,O(S)} + D_{B,W,O(NS)} + D_{RC,S(S)} + D_{RC,S(NS)}$$

$$D_{Total} = 10\ 248.30\ kg$$

2.6 Incertidumbre asociada al riesgo sísmico

Los cálculos de riesgo sísmico cuentan con una gran incertidumbre debido a la complejidad que tiene modelar un fenómeno que por su naturaleza es variable y se encuentra en estudio constante.

Según Spence (2007), la incertidumbre se clasifica en dos tipos, la aleatoria y la epistémica. La primera describe la variabilidad de un evento repetible, esta incluye la variabilidad natural asociada a un fenómeno la cual no es posible controlar o predecir. Como parte de este tipo de incertidumbre en riesgo sísmico se incluye la incertidumbre debida a fenómenos naturales: la ubicación de futuros terremotos, propiedades de la fuente sísmica, dispersión del movimiento del suelo con respecto a la media y la incertidumbre debida a procesos realizados por el ser humano; las propiedades mecánicas de los materiales de construcción. Por otro lado, la incertidumbre epistémica se origina debido a la falta de conocimiento en algunos fenómenos, variables o simplificaciones tomadas a la hora de modelar el cálculo. Por ejemplo, la selección de modelos de movimiento del suelo, simplificaciones en la representación de las estructuras (2D o 3D), desempeño de las conexiones, entre otras.

Específicamente con relación a los modelos de consecuencias se tiene incertidumbre epistémica en la relación entre los niveles de daño y las pérdidas (directas o indirectas), además a la fecha, se realizan simplificaciones importantes, por ejemplo, el uso de factores de pérdidas por clase de ocupación (sin considerar específicamente distintas tipologías constructivas). Lo importante es que este tipo de incertidumbre se puede reducir realizando estudios en las líneas mencionadas para representar de manera más completa la zona de interés para la estimación de riesgo sísmico.

Algunas iniciativas no consideran la incertidumbre directamente en los cálculos de riesgo sísmico, sino que dejan a interpretación de expertos o comparación de datos de pérdidas históricas para la zona de estudio en cuestión. Por otro lado, algunas iniciativas como Durukal (2006), propone distintos escenarios de estudio, conociendo la desviación estándar asociada a los factores de pérdidas (modelos de consecuencias) planteando tres escenarios,

1. Escenario de vulnerabilidad media, 2. Escenario de máxima vulnerabilidad y 3. Escenario de mínima vulnerabilidad. En cada escenario se varían los factores de pérdidas a partir de la desviación estándar asociada. Entre los resultados presentados por dicha iniciativa se obtiene un rango de pérdidas considerando los tres escenarios de 4% a 36%, por lo tanto, se puede comprobar la alta incertidumbre asociada a dicha estimación.

Cabe mencionar que según Spence (2007), a nivel mundial se han producido esfuerzos en comprender y reducir la incertidumbre en etapas iniciales del cálculo del riesgo sísmico como los son: análisis de la amenaza sísmica, modelado de la respuesta estructural y definición de estados de desempeño.

3 Modelos de consecuencias estudiados

El objetivo de este capítulo es presentar la recopilación de las principales iniciativas de riesgo sísmico que estiman pérdidas tanto humanas como económicas a nivel mundial utilizando modelos de consecuencias. De cada iniciativa identificada se presenta la siguiente información: región geográfica aplicable, tipologías constructivas consideradas, metodología utilizada para estimar las pérdidas, clasificación de los estados de daño considerados y en algunos casos la consideración de la incertidumbre.

3.1 Pérdidas económicas

A continuación, se presentan las principales iniciativas para la estimación de pérdidas económicas que utilizan modelos de consecuencias.

A manera de comparación, se presenta el Cuadro 3.1 con un resumen de la información de las iniciativas identificadas.

Cuadro 3.1. Resumen de las iniciativas identificadas para estimar pérdidas económicas

Nº	Iniciativa de riesgo sísmico	Región	Portafolio	Tipologías consideradas	Clasificación del daño	Tipo de pérdidas estimadas	Metodología aplicada
1	FEMA (2020)	Estados Unidos	Siete clasificaciones de portafolios	Considera 33 clases de ocupación	HAZUS (1999)	C_{rep}/C_{rem}^1 y otras pérdidas	Analítica
2	Yepes y Silva (2017)	América del Sur	Residencial	Sin distinción	HAZUS (1999)	C_{rep}/C_{rem}	Semi-empírica
3	Bal et al. (2006)	Turquía	Sin distinción	Marcos de concreto reforzado con rellenos de mampostería	HAZUS (1999)	C_{rep}/C_{rem} , se considera demolición y transporte	Semi-empírica
4	Durukal et al. (2006)	Turquía	Sin distinción	Marcos de concreto reforzado	EMS 98	C_{rep}/C_{rem}	Semi-empírica

5	Di Pasquale et al. (2005)	Italia	Sin distinción	Sin distinción	EMS 98	C_{rep}/C_{rem}	Semi-empírica
6	Kostov et al. (2004)	Bulgaria	Sin distinción	Sin distinción	EMS 98	C_{rep}/C_{rem}	Semi-empírica
7	Milutinovic y Trendafiloski (2003)	Italia	Sin distinción	Sin distinción	EMS 98	C_{rep}/C_{rem}	Semi-empírica
8	FEMA (1999)	Estados Unidos	Siete clasificaciones de portafolio	Sin distinción	HAZUS (1999)	C_{rep}/C_{rem}	Semi-empírica

1. C_{rep}/C_{rem} : Costo de reparación/Costo de reemplazo (reposición)

Con el objetivo de comparar las razones de C_{rep}/C_{rem} propuestas por cada iniciativa, se realizan los siguientes cuadros, en los cuales se compara los factores tanto de la clasificación de daño HAZUS 1999 y EMS 98.

Cuadro 3.2. Comparación de factores de las iniciativas con clasificación de daño HAZUS (1999).

Iniciativa de riesgo sísmico	Daño leve (%)	Daño moderado (%)	Daño extensivo (%)	Daño completo (%)
FEMA (2020) ¹	2	10	44.7	100
Yepes y Silva (2017)	5	25	60	100
Bal et al. (2006)	16	33	105	104
FEMA (1999)	2	10	50	100

1. Los factores de la iniciativa FEMA (2020) varían según la clase de ocupación, se presenta en este caso los factores para una vivienda unifamiliar.

Cuadro 3.3. Comparación de factores de las iniciativas con clasificación de daño EMS 98.

Iniciativa de riesgo sísmico	DS0 (%)	DS1 (%)	DS2 (%)	DS3 (%)	DS4 (%)	DS5 (%)
Durukal et al: (2006)	0	10	20	40	90	100
Di Pasquale et al. (2005)	0	1	10	35	75	100
Kostov et al. (2004)	0	1	10	40	80	100
Milutinovic y Trendafiloski (2003)	0	1	10	35	75	100

Con el objetivo de adaptar la aplicación de iniciativas de evaluación de riesgo que utilizan la clasificación de daño EMS 98 a las curvas de fragilidad con cuatro estados de daño además del daño nulo, se determina que la combinación del estado de daño 3 (DS3) y el estado de daño 4 (DS4) equivalen al daño extensivo de HAZUS (1999), por lo tanto, se calcula el valor promedio entre ambos factores y se muestra el resultado en el Cuadro 3.4, además se incluyen todas las iniciativas para poder comparar la variación en los valores de los factores propuestos.

Cuadro 3.4. Comparación de los factores propuestos por las iniciativas con clasificación de daño EMS 98 con la equivalencia a HAZUS (1999) y HAZUS (1999).

Iniciativa de riesgo sísmico	Daño leve (%)	Daño moderado (%)	Daño extensivo (%)	Daño completo (%)
FEMA (2020)	2	10	44.7	100
Yepes y Silva (2017)	5	25	60	100
Bal et al. (2006)	16	33	105 ¹	104
Durukal et al. (2006)	10	20	65	100
Di Pasquale et al (2005)	1	10	55	100
Kostov et al. (2004)	1	10	60	100

Milutinovic y Trendafiloski (2003)	1	10	55	100
FEMA (1999)	2	10	50	100

1. En el caso del factor propuesto por Bal et al. (2006) para daño extensivo, se observa que es mayor al de daño completo, esto se debe a que se considera que las estructuras con dicho estado de daño además de costo de acarreo, se debe demoler parte de la estructura por lo que el factor es mayor.

A continuación, se presenta una recopilación de las principales consideraciones e información de interés de cada iniciativa para la estimación de pérdidas económicas identificada.

3.1.1 FEMA (2020)

HAZUS es el nombre de la iniciativa desarrollada por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) de Estados Unidos, para su aplicación en dicho país. En esta iniciativa se tiene un amplio alcance en lo que se refiere al cálculo de riesgo sísmico, ya que toma en cuenta: edificios generales, sistemas de transporte (Autopistas, ferrocarriles, buses, puertos, ferry, aeropuertos), servicios públicos (agua potable, petróleo, gas natural, electricidad, telecomunicaciones). Sin embargo, la información de interés en esta investigación corresponde a edificios generales, principalmente los que apliquen al portafolio residencial.

Para la estimación de las pérdidas económicas se clasifica el inventario de edificios por clases de ocupación: residencial, comercial, industrial, agricultura, religión, gubernamental y educación, cada uno de ellos con distintas sub-clasificaciones generando finalmente 33 clases de ocupación, tanto el código de cada clase como su descripción se encuentra en la Tabla 11-1 del Manual Técnico HAZUS (FEMA, 2020). Se utiliza la clasificación de daño de la metodología HAZUS (1999).

El tipo de pérdidas estimadas corresponde a costo de reparación estructural del edificio, costo de reparación no estructural, costo del contenido del edificio, costo del inventario comercial, también se estima el tiempo de reparación del edificio y el tiempo para recuperar la funcionalidad del mismo. Con respecto al costo de reparación estructural del edificio, la información se presenta en la tabla 11-2 del Manual Técnico HAZUS (FEMA, 2020), a continuación se presenta el Cuadro 3.5 con un extracto de la información de dicha tabla.

Cuadro 3.5. Extracto de la tabla 11-2 (Factores de costo de reparación por daños estructurales) del Manual Técnico de HAZUS.

No	Etiqueta	Clase de ocupación	Estado de daño estructural			
			Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
1	RES1	Vivienda unifamiliar	0.5	2.3	11.7	23.4

Fuente: FEMA (2020), modificado por Rodríguez (2022)

El costo de reparación no estructural del edificio se divide en dos: el costo no estructural sensible a la aceleración (Tabla 11-3 del Manual Técnico HAZUS (FEMA, 2020), se presenta un extracto de dicha tabla en el Cuadro 3.6) y el costo no estructural sensible a la deriva de piso (Tabla 11-4 del Manual Técnico HAZUS (FEMA, 2020), se presenta un extracto de dicha tabla en el Cuadro 3.7). Para estimar las pérdidas totales para cada clase de ocupación se debe combinar el resultado del costo estructural y ambos casos del costo no estructural. En el caso de las pérdidas de contenido del edificio, se aplican los mismos factores para todas las clases de ocupación y para daño completo se asume que se recupera cierta parte del contenido, los factores se encuentran en la Tabla 11-5 del Manual Técnico HAZUS (FEMA, 2020), sin embargo, no se incluye extracto de dicha tabla ya que en este estudio no se considera este tipo de pérdidas económicas.

Cuadro 3.6. Extracto de la tabla 11-3 (Factores de costo de reparación por daños no estructurales sensible a la aceleración) del Manual Técnico de HAZUS.

No	Etiqueta	Clase de ocupación	Estado de daño estructural			
			Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
1	RES1	Vivienda unifamiliar	0.5	2.7	8.0	26.6

Fuente: FEMA (2020), modificado por Rodríguez (2022)

Cuadro 3.7. Extracto de la tabla 11-4 (Factores de costo de reparación por daños no estructurales sensible a las derivas) del Manual Técnico de HAZUS.

No	Etiqueta	Clase de ocupación	Estado de daño estructural			
			Ligero	Moderado	Extensivo	Completo
1	RES1	Vivienda unifamiliar	1.0	5.0	25.0	50.0

Fuente: FEMA (2020), modificado por Rodríguez (2022)

Las pérdidas de inventario comercial se calculan según la ecuación 11-11 del Manual Técnico HAZUS (FEMA, 2020) y aplicando los factores de la tabla 11-6 del mismo. A continuación, se presenta la ecuación utilizada para la estimación de dichas pérdidas:

$$INV_i = FA_i * SALES_i * BI_i * \sum_{ds=2}^5 PONS A_{ds,i} * INV D_{ds,i}$$

Donde:

INV_i : es el valor de las pérdidas de inventario para la clase de ocupación, i.

FA_i : es la superficie construida de la clase de ocupación, i (en pies cuadrados).

$SALES_i$: es la producción o ventas brutas anuales (por pie cuadrado) para la clase de ocupación, i.

BI_i : es el inventario comercial como porcentaje de las ventas brutas anuales para la clase de ocupación, i.

$PONS A_{ds,i}$: es la probabilidad de que la clase de ocupación, i, se encuentre en un estado de daño no estructural sensible a la aceleración, ds.

$INV D_{ds,i}$: es el porcentaje de daño de inventario para la clase de ocupación, i, en estado de daño, ds; de la Tabla 11-6 del Manual Técnico HAZUS (FEMA, 2020).

El tiempo de reparación del edificio se calcula a partir de la tabla 11-7 donde se presenta la cantidad de días de reparación considerada para cada clase de ocupación, en la tabla 11-8 se presenta el tiempo de recuperación de las funciones del edificio en días. Dicha estimación al igual que las pérdidas de inventario comercial, se escapan del alcance de este estudio, por lo que se presenta la información de interés y para indagar más en las mismas se puede consultar el Manual Técnico de HAZUS (FEMA, 2020).

El enfoque de la iniciativa es analítico y cuenta con tres niveles de análisis cada uno con diferente requerimiento de información y cálculos. En el nivel 1 de análisis, se considera una condición de suelo promedio para la zona de estudio y se ignoran los efectos de posible licuefacción y deslizamientos. El nivel de análisis 2 y 3, permite incluir mapas de condición de suelo que afecten el movimiento del suelo, permite analizar el riesgo de licuefacción y deslizamientos, además, permite analizar otras tipologías constructivas mientras que el usuario incluya la información de estas y en estos casos se tiene acceso a información más detallada para la estimación de pérdidas de sistemas de transporte y servicios públicos por lo que se esperaría una menor incertidumbre en los resultados.

Esta iniciativa cuenta con el software HAZUS (FEMA, 2020) para la realización de los cálculos.

3.1.2 Yepes y Silva (2017)

Esta iniciativa se ha desarrollado para la evaluación de daños en el portafolio residencial en América del Sur, específicamente en Argentina, Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela como parte del proyecto Evaluación de Riesgo en Suramérica (SARA por sus siglas en inglés) llevado a cabo por la fundación GEM.

El modelo de consecuencias propuesto en este estudio se aplica al portafolio residencial sin hacer distinción entre las tipologías que se consideren y de esa forma se generan funciones de vulnerabilidad a partir de funciones de fragilidad y de consecuencias. Las funciones de vulnerabilidad describen la razón de costo de reparación / costo de reemplazo para una de intensidad sísmica determinada, se asume que se incluye el daño estructural y no estructural. Para generar las funciones de vulnerabilidad y los cálculos de riesgo sísmico mencionados se utilizó el software OpenQuake (GEM, 2020). En el caso de esta iniciativa se utiliza la clasificación de daño de la metodología HAZUS (1999).

3.1.3 Bal et al. (2008)

Esta iniciativa se ha desarrollado para su aplicación en Turquía, en este caso, se evalúa el daño de los edificios con base en desplazamiento (derivadas), comparando la capacidad de desplazamiento de los edificios con el desplazamiento demandado al analizar escenarios sísmicos y se ha aplicado para evaluar estructuras tipo marco de concreto reforzado con rellenos de mampostería.

A partir de la estimación de daños basada en desplazamientos, se aplican los factores de costo de reparación que incluye demolición y transporte / costo de reemplazo, se asume que se incluye el daño estructural y no estructural. En el caso de esta iniciativa se utiliza la clasificación de daño de la metodología HAZUS (1999).

Es importante mencionar que, de acuerdo al código y ley de Turquía, después de un terremoto solo los edificios con daño leve y moderado son reparados, mientras que los que tienen daño extensivo y completo se deben demoler y construir nuevamente. Además, se considera un costo extra debido a la demolición y acarreo de escombros en los casos mencionados.

Los factores de daño se basan en datos de costos de reparación o reemplazo obtenidos para 231 edificios dañados después de los terremotos de Ceyhan de 1998 y Kocaeli de 1999 en Turquía. Esta iniciativa se cataloga como semi-empírica.

3.1.4 Durukal et al. (2006)

Esta iniciativa se ha desarrollado para su aplicación en Turquía, específicamente con el objetivo de conocer las potenciales implicaciones económicas de un terremoto para el Fondo de Seguros y se ha aplicado para evaluar edificios tipo marco de concreto reforzado de baja (1-4 niveles), media (5-8 niveles) y gran altura (9>niveles). Utilizando el modelo de consecuencias estiman costo de reparación / costo de reemplazo y se asume que se incluye el daño estructural y no estructural. Los factores propuestos fueron obtenidos consultando a los expertos en seguros por lo que esta iniciativa se clasifica como semi-empírica. En el caso de esta iniciativa se utiliza la clasificación de daño EMS 98.

La incertidumbre en las cifras de pérdidas que surgen de la variabilidad en los factores aplicados se incorpora considerando que estos siguen una distribución normal. Para esto, proponen escenarios variando los factores de pérdidas conociendo la desviación estándar de esta variable, obteniendo tres escenarios: 1. El escenario de vulnerabilidad media, 2. El escenario de vulnerabilidad máxima (valor de media +1 desviación estándar del factor de pérdidas) y 3. El escenario de vulnerabilidad mínima (valor de media -1 desviación estándar del factor de pérdidas).

3.1.5 Di Pasquale et al. (2005)

Esta iniciativa se ha desarrollado para su aplicación en Italia. La información de esta publicación fue obtenida del documento realizado por GEM (2013) ya que no fue posible ubicar la publicación específica.

El modelo de consecuencias propuesto en este estudio se utiliza sin diferenciar tipologías constructivas. Las pérdidas estimadas corresponden a costo de reparación / costo de reemplazo. Los factores propuestos fueron obtenidos con base en el criterio de expertos por lo que esta iniciativa se clasifica como semi-empírica. En el caso de esta iniciativa se utiliza la clasificación de daño de la metodología EMS 98.

3.1.6 Kostov et al. (2004)

Esta iniciativa se ha desarrollado para la evaluación de daños en Bulgaria como parte del proyecto Risk-UE. La información de esta publicación fue obtenida del documento realizado por GEM (2013) ya que no fue posible ubicar la publicación específica.

El modelo de consecuencias propuesto en este estudio se utiliza sin diferenciar tipologías constructivas. Las pérdidas estimadas corresponden a costo de reparación / costo de reemplazo, se asume que se incluye el daño estructural y no estructural. Los factores propuestos fueron obtenidos con base en el criterio de expertos y la experiencia del país por lo que esta iniciativa se clasifica como semi-empírica. En el caso de esta iniciativa se utiliza la clasificación de daño de la metodología EMS 98.

3.1.7 Milutinovic y Trendafiloski (2003)

Esta iniciativa se ha desarrollado para la evaluación de daños en Italia como parte del proyecto Risk-UE. Permite dos niveles de análisis, el primero se conoce como el método del índice de vulnerabilidad; el segundo como espectros de capacidad y curvas de fragilidad. Como se ha explicado anteriormente, los modelos de consecuencias se aplican a partir de un estado de daño obtenido de curvas de fragilidad por lo que se aplicaría al segundo nivel de análisis de esta iniciativa para estimar el costo de reparación / costo de reemplazo y se asume que se incluye el daño estructural y el no estructural.

Se consideran cuatro tipologías constructivas: mampostería, concreto reforzado, acero y madera. Cada una de ellas con distintas clasificaciones según la altura de la construcción.

Sin embargo, se aplican los mismos factores de pérdidas sin diferenciar entre tipologías constructivas.

En el Cuadro 3.8 se muestran los factores propuestos en esta publicación, se utiliza la clasificación de daño de la metodología EMS 98, sin embargo, en dicha iniciativa se presenta una equivalencia entre la clasificación de daño HAZUS 1999 y EMS 98, la cual consiste en considerar que el daño extensivo de HAZUS 1999 abarca el DS3 y DS4 de EMS 98.

Cuadro 3.8. Factores de pérdidas propuestos por Milutinovic y Trendafiloski (2003).

EMS 98	DS0	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5
HAZUS 1999	Sin daño	Daño ligero	Daño moderado	Daño Extensivo		Daño Completo
(% C_{rep}/C_{rem})	0%	1%	10%	35%	75%	100%

Los factores en esta iniciativa son propuestos por socios que colaboraron en la elaboración de la misma. Su derivación se clasifica como semi-empírico.

3.1.8 FEMA (1999)

Esta iniciativa se ha desarrollado para su aplicación en Estados Unidos. La información de esta publicación fue obtenida del documento realizado GEM (2013) ya que no fue posible ubicar la publicación específica. El modelo de consecuencias propuesto en este estudio se utiliza sin diferenciar tipologías constructivas. Las pérdidas estimadas corresponden al costo de reparación / costo de reemplazo, se asume que se incluye el daño estructural y no estructural. Esta iniciativa es derivada utilizando métodos empíricos y con base en el criterio de expertos, por lo que se clasifica como semi-empírica. En el caso de esta iniciativa se utiliza la clasificación de daño de la metodología HAZUS (1999).

3.2 Víctimas

A manera de resumen y para comparar la información de las iniciativas identificadas, se presenta el Cuadro 3.9.

Cuadro 3.9. Resumen de información para comparar las iniciativas para estimar víctimas

Nº	Iniciativa de estimación de pérdidas	Región para la cual se desarrolló	Tipologías consideradas	Clasificación del daño	Tipo de pérdidas estimadas	Metodología
1	FEMA (2020)	Estados Unidos	36 tipologías constructivas	HAZUS (1999)	Muertes y lesiones	Semi-empírica
2	Miyamoto (2016)	Costa Rica	15 tipologías constructivas	HAZUS (1999)	Muertes	Semi-empírica
3	So y Pomonis (2012)	Global	Considera cinco tipologías constructivas	No aplica	Muertes	Empírica
4	Jaiswal y Wald (2010)	Global	11 tipologías constructivas	Enfocado en edificios colapsados	Muertes	Empírica
5	Spence (2007)	Europa	Estructuras de concreto reforzado	HAZUS (1999)	Muertes y lesiones	Semi-empírica

3.2.1 FEMA (2020)

Esta iniciativa se ha desarrollado para su aplicación en Estados Unidos. La estimación de muertes y lesiones considera las relacionadas al daño de los edificios y puentes causado por el terremoto. Para la estimación de las víctimas se analizan escenarios (diurno-nocturno) que varían la ocupación de las edificaciones.

Se clasifican las lesiones en cuatro niveles definidos en HAZUS (1999):

- i. Severidad 1: Heridos que requieren atención medica básica
- ii. Severidad 2: Hospitalizados
- iii. Severidad 3: Heridos gravemente
- iv. Severidad 4: Muertos o heridos de muerte

En este caso se presentan los factores para 36 tipologías constructivas consideradas. La descripción y consideraciones de estas tipologías constructivas se encuentra en la en la

sección 5.3.1 del Manual Técnico HAZUS (FEMA, 2020), mientras que los factores se presentan en la tabla 12-3 para daño ligero, tabla 12-4 para daño moderado, tabla 12-5 para daño extensivo, tabla 12-6 para daño completo sin colapso y tabla 12-7 para daño completo con colapso. Además, en la tabla 12-8 se presentan las tasas de colapso para todas las tipologías consideradas, dicha tabla describe el porcentaje de edificios con daño completo que colapsa. A continuación se presentan el Cuadro 3.10 con un extracto de la tabla 12-8 del Manual Técnico de HAZUS (FEMA, 2020).

Cuadro 3.10. Extracto de la tabla 12-8 (Razones de colapso por tipología para daño estructural completo) del Manual Técnico de HAZUS.

#	Tipología	Probabilidad de colapso dado el estado de daño completo
1	W1	3%
2	W2	3%
3	S1L	8%
4	S1M	5%
5	S1H	3%
6	S2L	8%
7	S2M	5%
8	S2H	3%

Fuente: FEMA (2020), modificado por Rodríguez (2022)

También se presentan factores de víctimas para escenarios exteriores a las edificaciones, estas consideran las personas que se encuentran en las cercanías de las edificaciones y pueden verse afectados por la caída de materiales. Los factores se presentan en las tablas 12-9, 12-10 y 12-11 del Manual Técnico de HAZUS (FEMA, 2020). A continuación se presenta el Cuadro 3.11 con un extracto de la tabla 12-11 del Manual Técnico de HAZUS (FEMA, 2020).

Cuadro 3.11. Extracto de la Tabla 12-11 (Factores de estimación de víctimas por tipología para daño estructural completo, para escenario exterior) del Manual Técnico de HAZUS.

No	Tipología	Severidad de la lesión (%)			
		Severidad 1	Severidad 2	Severidad 3	Severidad 4
1	W1	2	0.5	0.1	0.05

Fuente: FEMA (2020), modificado por Rodríguez (2022)

Se menciona que los factores de estimación de víctimas son obtenidos del método ATC-13, los cuales se han calibrado y comparado con eventos reales ocurridos en el pasado obteniendo resultados razonables. Sin embargo, el usuario debe saber interpretar los datos y ser cauteloso con los resultados, por ejemplo, una forma de leer e interpretar los resultados es la siguiente: la cantidad de heridos con severidad 3 se encuentra en el orden de cientos de heridos y a partir de esa información tomar decisiones, a quien le corresponda. “Los resultados de un cálculo de riesgo sísmico nunca deben presentarse o interpretarse como predicción de daños o pérdidas, sino como una estimación la cual tiene incertidumbre asociada a las múltiples variables, condiciones y escenarios” (FEMA, 2020).

Esta iniciativa utiliza el software HAZUS y se clasifica como semi-empírica.

3.2.2 Miyamoto (2016)

En este caso se trata del programa “Rescate y Personal de Emergencia para Mejorar la Respuesta ante Terremotos” (PREPARE por sus siglas en inglés), en el cual se realizan evaluaciones de riesgo sísmico en el cantón de San José. En el caso específico de la estimación de víctimas, se proponen factores derivados de la iniciativa HAZUS, los cuales se modifican para la aplicación en Costa Rica. Dicha modificación fue estimada por investigadores del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) por sus siglas en inglés. Luego de generar el factor de modificación, estos se calibran considerando los datos de terremotos ocurridos en el pasado como el de Cartago de 1910, Cinchona en el 2009, así como el de Ecuador de 2016.

En dicho programa se identifican 15 tipologías constructivas las cuales describen los portafolios considerados y estiman las muertes para escenario diurno y nocturno. Además, dichas tipologías se asocian a curvas de fragilidad generadas por FEMA (2001), por lo tanto, estas cuentan con la clasificación de daño de la iniciativa HAZUS. Sin embargo, en este caso

no se considera el colapso de las edificaciones. A continuación, se presentan los factores propuestos:

Cuadro 3.12. Factores de víctimas propuestos para San José.

Tipología	Descripción	Nivel (es)	DS1	DS2	DS3	DS4
1	Estructura ligera sin diseño formal	1-3	0	9.00E-07 (9 de cada millón)	2.84E-05 (2.84 de cada 100 000)	4.08E-03 (4.08 de cada mil)
2		+4	0	9.00E-07	2.84E-05	4.08E-03
3	Mampostería sin refuerzo	1-3	0	3.36E-05	6.72E-05	4.24E-02
4		+4	0	3.36E-05	6.72E-05	4.24E-02
5	Mampostería reforzada/confinada	1-3	0	0	3.10E-05	2.80E-02
6		+4	0	0	3.36E-05	2.48E-02
7	Marco de concreto reforzado	1-3	0	0	2.84E-05	2.80E-02
8		+4	0	0	3.10E-05	2.48E-02
9	Muro de concreto reforzado	1-3	0	0	2.84E-05	2.80E-02
10		+4	0	0	3.10E-05	2.48E-02
11	Marco de acero	1-3	0	0	2.84E-05	1.83E-02
12		+4	0	0	3.10E-05	1.51E-02
13	Marco de acero arriostrado	1-3	0	0	2.84E-05	1.83E-02
14		+4	0	0	3.10E-05	1.51E-02
15	Informal	1-3	0	3.36E-05	6.72E-05	4.24E-02

Fuente: Miyamoto (2016).

En el caso de este programa se utiliza el software OpenQuake (GEM, 2020). Y se clasifica la iniciativa como semi-empírica.

3.2.3 So y Pomonis (2012)

Esta iniciativa se ha desarrollado para su aplicación a nivel global. El objetivo de esta investigación es generar factores de víctimas para metodologías empíricas, estas tasas se

obtienen a partir de información de terremotos ocurridos en el pasado. Los factores se estiman como porcentaje de ocupantes muertos para las tipologías consideradas.

Los factores propuestos se muestran en el Cuadro 3.13.

Cuadro 3.13. Factores de víctimas propuestos por So y Pomonis (2012).

Tipología constructiva	Factores de víctimas	Terremoto de referencia
Edificaciones de adobe con techo ligero	10%	Pisco 2007
Mampostería estructural (baja altura)	6-8%	Italia 1970-1990
Mampostería estructural (4-7 niveles)	13-16%	Italia 1970-1990
Mampostería confinada	2%	Chile 2011
Mampostería confinada de baja calidad	30%	Haiti 2010

Fuente: So y Pomonis (2012).

3.2.4 Jaiswal y Wald (2010)

Esta iniciativa se ha desarrollado para su aplicación a nivel global, como parte del programa: Evaluación rápida de terremotos globales para respuesta (PAGER por sus siglas en inglés). El objetivo de este programa es estimar rápidamente el impacto de los terremotos para que los gobiernos y agencias de seguros tomen decisiones.

Esta iniciativa se enfoca en edificios colapsados para la estimación de víctimas. Para ello, desarrollaron un estudio con la probabilidad de colapso de las principales tipologías constructivas en función de la escala de intensidad de Mercalli Modificada (Wood y Neumann, 1931).

Los factores propuestos se muestran en el Cuadro 3.14, estos son derivados a partir de estudios realizados por investigadores de diferentes partes del mundo como parte del proyecto WHE-PAGER (D'Ayala et al., 2010). El enfoque de esta iniciativa es empírico.

Cuadro 3.14. Factores de víctimas propuestos por Jaiswal y Wald (2010).

Tipología constructiva	Factor de víctimas (% de víctimas/ocupantes)
Edificaciones de adobe	6%
Edificaciones con paredes de barro	6%
Marcos de momento de concreto no dúctiles	15%
Marcos de momento de concreto dúctiles	15%
Edificaciones prefabricadas	10%
Mampostería en bloque o revestida de piedra	8%
Mampostería de escombros o piedra de campo	6%
Mampostería de ladrillo con mortero de cal / cemento	6%
Marco de momento de acero con muro de relleno de concreto	14%
Estructura de madera ligera diseñada para cargas sísmicas	0.7%
Marcos de madera de postes y vigas pesadas	1.3%

Con respecto a la incertidumbre, en esta iniciativa se realiza un análisis probabilístico, comparando los resultados obtenidos a partir de los factores de víctimas con información de terremotos pasados, los factores son propuestos basados en el criterio expertos, posteriormente se comparan las estimaciones usando dichos factores con los datos de terremotos pasados y se calcula un coeficiente de relación para determinar la calidad de ajuste de la estimación con respecto a los datos documentados.

3.2.5 Spence (2007)

Esta iniciativa se ha desarrollado para su aplicación en tres ciudades europeas: Estambul, Lisboa y Salónica como parte del Proyecto LessLoss. Se realizan estimaciones de víctimas en función del daño de las edificaciones. Las edificaciones consideradas corresponden a estructuras de concreto reforzado.

Se clasifican las lesiones en cuatro niveles definidos en HAZUS (1999):

- i. Severidad 1: Heridos que requieren atención medica básica

- ii. Severidad 2: Hospitalizados
- iii. Severidad 3: Heridos gravemente
- iv. Severidad 4: Muertos o heridos de muerte

Para la estimación de pérdidas la categoría colapso se dividió en dos subcategorías, "colapso parcial" y "colapso total". Se asume que del total de edificios colapsados, el 10% corresponden a colapsos totales y el 90% a colapsos parciales.

Los factores propuestos se muestran en el Cuadro 3.15. Se utiliza la clasificación de daño de la iniciativa HAZUS (1999). Los factores son derivados a partir de la información de terremotos anteriores ocurridos en Turquía. El enfoque es semi-empírico.

Cuadro 3.15. Factores de víctimas propuestos por Spence (2007).

Severidad de la lesión	Razones de las víctimas (% de víctimas/ocupantes)				
	Daño ligero	Daño moderado	Daño extensivo	Colapso	
				Parcial	Total
Severidad 1	0.05	0.2	1	10	50
Severidad 2	0.005	0.02	0.5	8	15
Severidad 3	0	0	0.01	4	10
Severidad 4	0	0	0.01	4	10

Fuente: Spence (2007).

Para este estudio se utiliza el software de modelado de pérdidas AUTH.

Con respecto a la incertidumbre, se menciona que varía dependiendo si el análisis de riesgo es probabilístico o con base en escenarios. Aunque de manera general se conoce que existe incertidumbre en: análisis de peligro sísmico, predicción de la respuesta estructural, definición de estados de desempeño, relación entre los estados de desempeño y los niveles de daño, relación entre los niveles de daño y la pérdida (directa, indirecta) y agregación de daños y pérdidas, cuando se tratan las existencias (por ejemplo, los inventarios de edificios).

Se identifica un conocimiento limitado en este campo, sobre todo en las últimas etapas del procedimiento (paso de daño a pérdidas). Se recomienda la realización de estudios de

referencia que traten el tema de la incertidumbre para darle más validez a los resultados y análisis.

3.3 Escombros

3.3.1 FEMA (2020)

La estimación de escombros sigue un procedimiento similar a los modelos de consecuencias, ya que estas estimaciones se obtienen aplicando factores a partir de niveles de daño definidos por las funciones de fragilidad. Aunque existe poca información con relación a la estimación de escombros, FEMA (2020) clasifica estos en dos tipos: 1. Los escombros de gran tamaño como piezas de acero o de concreto reforzado, estas son piezas que requieren que su tamaño sea reducido para poder acarrearlas; 2. Los escombros pequeños y medianos como bloques de mampostería, madera, vidrio y otros.

Como se mencionó anteriormente, la iniciativa FEMA (2020) para la estimación de escombros realiza dos cálculos intermedios. Primeramente, se estima el peso de la estructura a partir de un área de construcción (ton/ft^2 , sin embargo, estas unidades se convierten a unidades del Sistema Internacional: kg/m^2) y posteriormente se aplican factores que estiman el porcentaje de dicho peso que se espera como escombros dependiendo el estado de daño.

A continuación se presenta el Cuadro 3.16, en este se presentan los datos para estimar el peso para cada tipología constructiva (Primer paso de la estimación de escombros) a partir del área de construcción de la estructura. En la primera columna se presentan las 17 tipologías consideradas en el modelo de exposición utilizado en este estudio (En la sección 625.3.2 se presenta más información), en la segunda columna, la equivalencia generada entre dichas tipologías y las de la iniciativa FEMA (2020), mientras que en las siguientes columnas se presentan las razones de unidad de peso (kg/m^2) para cada tipo de escombros considerado por la iniciativa FEMA (2020).

Cuadro 3.16. Extracto de las tipologías de la Tabla 10-1 consideradas en el caso de estudio (Razones de unidad de peso (kg/m²) para elementos estructurales y no estructurales por tipología constructiva) del Manual Técnico de HAZUS.

Tipología	FEMA (2020)	Ladrillo, madera y otros		Concreto reforzado y acero	
		Estructural	No estructural	Estructural	No estructural
MCR_1	RM2L	170.89	51.75	273.42	39.06
MCR_2	RM2L	170.89	51.75	273.42	39.06
MCF_1	RM2L	170.89	51.75	273.42	39.06
MCF_2	RM2L	170.89	51.75	273.42	39.06
CR_D_A	PC2L	0.00	51.75	976.49	39.06
CR_D_B	PC2M	0.00	51.75	976.49	39.06
CR_D_C	PC2H	0.00	51.75	976.49	39.06
CR_I_A	C3L	195.30	51.75	878.84	39.06
CR_F_A	C1L	0.00	51.75	956.96	39.06
CR_F_C	C1H	0.00	51.75	956.96	39.06
CR_W_A	C2L	195.30	51.75	878.84	39.06
CR_W_C	C2H	0.00	51.75	956.96	39.06
S_F_C_A	S1L	0.00	51.75	429.66	48.82
S_F_H_A	S1L	0.00	51.75	429.66	48.82
W_F_A	W1	63.47	118.16	146.47	0.00
W_W_A	W1	63.47	118.16	146.47	0.00
INFOR	URML	341.77	102.53	400.36	39.06

Fuente: FEMA (2020), modificado por Rodríguez (2022)

A continuación, se presenta el Cuadro 3.17, en este se presentan los datos para estimar el porcentaje de escombros para los estados de daño extensivo y completo (Paso 2 de la estimación de escombros), la información de este es extraída de las tablas 10-2 y 10-3 del Manual Técnico de HAZUS (FEMA,2020).

Cuadro 3.17. Extracto de la tabla 10-2 y 10-3 (Factores de escombros estructurales y no estructurales debido a bloques, madera, concreto reforzado, acero y otros, en porcentaje de peso)

#	FEMA (2020)	Ladrillo, madera y otros				Concreto reforzado y acero			
		Estructural		No estructural		Estructural		No estructural	
		Extensiv o	Completo	Extensiv o	Completo	Extensiv o	Completo	Extensiv o	Completo
1	RM2L	60	100	31	100	35	100	30	100
2	PC2L	0	100	35	100	35	100	30	100

3	PC2M	0	100	35	100	35	100	30	100
4	PC2H	0	100	35	100	35	100	30	100
5	C3L	60	100	35	100	32	100	30	100
6	C1L	0	100	35	100	33	100	28	100
7	C1H	0	100	35	100	33	100	28	100
8	C2L	0	100	35	100	35	100	30	100
9	C2H	0	100	35	100	35	100	30	100
10	S1L	0	100	35	100	30	100	28	100
11	W1	34	100	35	100	27	100	0	100
12	URML	55	100	45	100	25	100	29	100

Fuente: FEMA (2020), modificado por Rodríguez (2022)

3.3.2 Miyamoto (2016)

En el caso de este proyecto, se utiliza una metodología de estimación de escombros empírica desarrollada a raíz del terremoto de Haití del año 2010. Sin embargo, no se brinda más información de referencia de la misma.

La estimación para Costa Rica se realiza siguiendo la ecuación [5] presentada a continuación.

$$w = \frac{1}{A} * c_f N(c_s A t + c_w L h t_w + c_m) \quad [5]$$

Donde:

w: Estimación de volumen de escombros (m³/m²)

A: área de la huella del edificio.

N: número de niveles del edificio.

At: Volumen de losa por nivel.

Lht_w: Volumen de muros por nivel.

c_f, c_s, c_w, c_m: Factores de modificación.

A partir de dicha ecuación se obtienen los factores mostrados en el Cuadro 3.18 para las 15 tipologías consideradas en dicho proyecto. Sin embargo, se observa que al generar la equivalencia con las tipologías consideradas en este estudio (Columna 1), se utilizan ocho tipologías de las consideradas por Miyamoto (2016).

Cuadro 3.18. Factores para la estimación de escombros de la metodología Miyamoto (2016) aplicados en el caso de estudio

Tipología	Tipología Miyamoto (2016)	Volumen de escombros m ³ /(m ² de área del nivel)/cantidad de niveles
W_F_A, W_W_A	01	0.398
MCR_1, MCR_2, MCF_1, MCF_2	05	0.830
CR_D_A, CR_I_A, CR_F_A	07	0.830
CR_D_B, CR_D_C, CR_F_C	08	0.830
CR_W_A	09	0.830
CR_W_C	10	0.830
S_F_C_A, S_F_H_A	11	0.453
INFOR	15	0.830

Fuente: Miyamoto (2016), modificado por Rodríguez (2022)

4 Generación de curvas de vulnerabilidad a partir de funciones de fragilidad y de consecuencias

En este capítulo se presenta la metodología de GEM para generar funciones de vulnerabilidad. Como se ha explicado anteriormente, la fragilidad describe la probabilidad de excedencia de ciertos estados de daño definidos a partir de una medida de intensidad sísmica, mientras que la vulnerabilidad describe las razones de pérdidas (por ejemplo: porcentaje costo de reparación/reposición, porcentaje fallecimientos/ocupantes, entre otros) a partir de una medida de intensidad sísmica.

4.1 Metodología de GEM

Matemáticamente las funciones de fragilidad corresponden a funciones de distribución log-normal acumulada, estas se construyen a partir de dos variables, definidas para cada estado de daño, un valor de media y la desviación estándar. Dicho formato simplificado es el que se utiliza para cada tipología en el archivo que se utiliza para el programa OpenQuake (GEM, 2020).

Para obtener las funciones de vulnerabilidad, se requiere generar la matriz de probabilidad de daño utilizando la siguiente ecuación:

$$P[ED_i/i] = \Phi(i, \ln(\bar{x}), \beta)$$

Donde:

$P[ED_i/i]$: Es la probabilidad de que ocurra el estado de daño ED_i cuando la estructura es sometida a una intensidad i .

Φ : Función de distribución log-normal acumulada.

i : Medida de intensidad sísmica, la cual se varía con cierto intervalo entre un valor mínimo y máximo.

\bar{x} : valor medio de intensidad en el que la estructura alcanza el umbral del estado de daño ED_i .

β : Desviación estándar asociado al valor medio de la medida de intensidad.

Se genera una matriz de probabilidad para un total de 17 tipologías consideradas. Dicha matriz consta de cinco vectores, los cuales se ordenan de la siguiente manera:

primeramente, se tiene el vector de la medida de intensidad que varía de un valor de 0.0001 hasta 4, con un paso de 0.01, luego la probabilidad de daño del estado de daño "Ligero", seguidamente la probabilidad de daño del estado de daño "Moderado", luego la probabilidad de daño del estado de daño "Extensivo" y finalmente, la probabilidad de daño del estado de daño "Colapso". A partir de este punto, se procede a generar la curva de vulnerabilidad.

Según L. Martins (comunicación personal, Agosto 20, 2021), el proceso para generar cualquier tipo de función de vulnerabilidad a partir de funciones de fragilidad y de consecuencias, consiste en aplicar el teorema de probabilidad total. Es decir, para cada nivel de intensidad, se multiplica la probabilidad del estado de daño considerado por el factor de pérdida para ese estado de daño y se suma el producto de todos los estados de daño.

Se presenta la ecuación que describe dicha operación:

$$FP_i = P(ED_{ligero}/i) * FP_{ligero} + P(ED_{moderado}/i) * FP_{moderado} + P(ED_{extensivo}/i) * FP_{extensivo} + P(ED_{colapso\ parcial}/i) * FP_{colapso\ parcial} + P(ED_{colapso\ total}/i) * FP_{colapso\ total}$$

Donde:

FP_i =Factor de pérdida correspondiente a una medida de intensidad i .

$P(ED_{ligero}/i)$ =Probabilidad de excedencia del estado de daño ligero para la medida de intensidad i .

FP_{ligero} =Factor de pérdidas para el estado de daño ligero.

$P(ED_{moderado}/i)$ =Probabilidad de excedencia del estado de daño moderado para la medida de intensidad i .

$FP_{moderado}$ =Factor de pérdidas para el estado de daño moderado.

$P(ED_{extensivo}/i)$ =Probabilidad de excedencia del estado de daño extensivo para la medida de intensidad i .

$FP_{extensivo}$ =Factor de pérdidas para el estado de daño extensivo.

$P(ED_{colapso\ parcial}/i)$ =Probabilidad de excedencia del estado de daño colapso parcial para la medida de intensidad i

$FP_{colapso\ parcial}$ = Factor de pérdidas para el estado de daño colapso parcial.

$P(ED_{colapso\ total}/i)$ = Probabilidad de excedencia del estado de daño colapso total para la medida de intensidad i .

$FP_{colpaso\ total}$ = Factor de pérdidas para el estado de daño colapso total.

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo realizado para la tipología MCF_1 para un PGA de 2 (g):

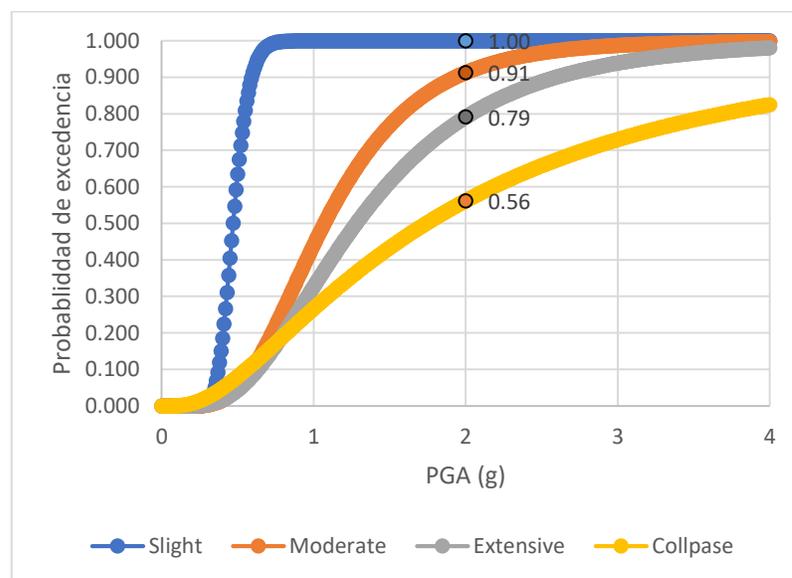


Figura 4.1. Curva de fragilidad para la tipología MCF_1.

Entonces, se tiene que:

$$P(ED_{ligero}/2) = 1 - 0.91 = 0.09$$

$$P(ED_{moderado}/2) = 0.91 - 0.79 = 0.12$$

$$P(ED_{extensivo}/2) = 0.79 - 0.56 = 0.23$$

$$P(ED_{colapso\ parcial}/2) = 0.56 * 0.87^1 = 0.487$$

$$P(ED_{colapso\ total}/2) = 0.56 * 0.13^1 = 0.073$$

1. Como se mencionó anteriormente, en el caso de la estimación de víctimas, es importante diferenciar si el edificio colapsa parcial o totalmente, para esto las iniciativas proponen o asumen una tasa de colapso. En este caso se propone que 13% de los edificios de esta tipología colapsa totalmente, por lo que se multiplica por 0.87 a la probabilidad de colapso parcial y 0.13 a la probabilidad de colapso total.

Ahora, según FEMA (2020), se proponen los siguientes factores de pérdidas para el portafolio residencial para severidad 4 (muertes instantáneas):

$$FP_{ligero} = 0$$

$$FP_{moderado} = 0$$

$$FP_{extensivo} = 0.00001 \text{ (1 muerte por cada 100 mil ocupantes expuestos)}$$

$$FP_{colapso\ parcial} = 0.0001 \text{ (1 muerte por cada 10 mil ocupantes expuestos)}$$

$$FP_{colapso\ total} = 0.1 \text{ (1 muerte por cada 10 ocupantes expuestos)}$$

Finalmente, se tienen todos los insumos para aplicar la ecuación X y se tiene que:

$$FP_2 = P(ED_{ligero}/2) * FP_{ligero} + P(ED_{moderado}/2) * FP_{moderado} + P(ED_{extensivo}/2) * FP_{extensivo} + P(ED_{colapso\ parcial}/2) * FP_{colapso\ parcial} + P(ED_{colapso\ total}/2) * FP_{colapso\ total}$$

$$FP_2 = 0.09 * 0 + 0.12 * 0 + 0.23 * 0.00001 + 0.487 * 0.0001 + 0.073 * 0.1$$

$$FP_2 = 0.00736 \text{ (7.36 muertes por cada 100 ocupantes expuestos)}$$

Al realizar dicho cálculo para todo el intervalo de la medida de intensidad y graficando se obtiene la curva de vulnerabilidad completa:

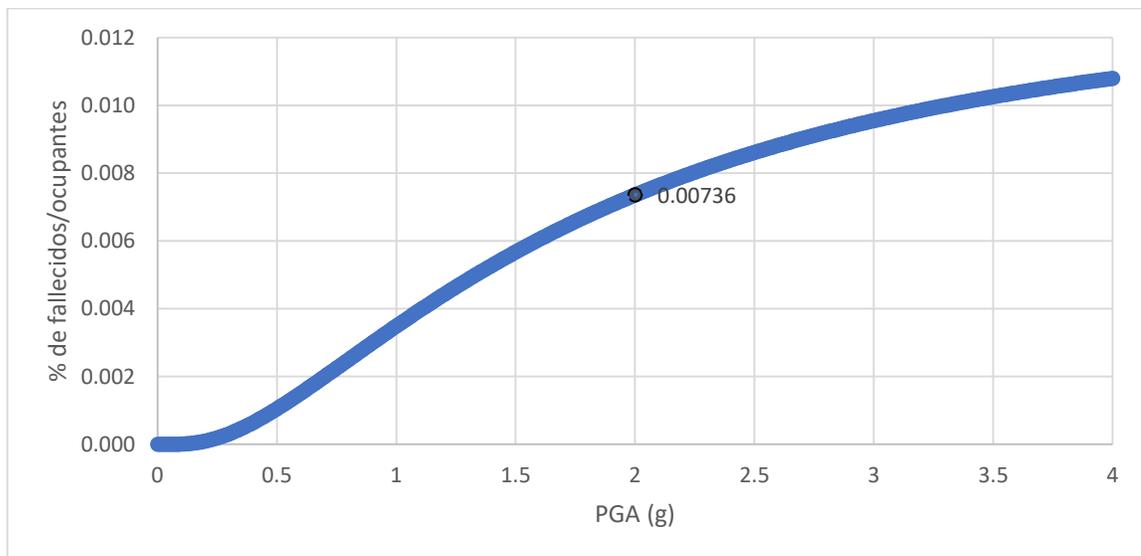


Figura 4.2. Curva de vulnerabilidad de la tipología MCF_1, aplicando el modelo de consecuencias FEMA (2020)

Se realiza una revisión del procedimiento utilizando el programa Vulnerability Modelers Toolkit (VMTK) (GEM, 2021). Este programa consiste en un conjunto de códigos de Python (Python Software Foundation, 2020) con una interfaz gráfica y cuenta con seis módulos con herramientas para generar funciones de fragilidad y vulnerabilidad. El módulo de vulnerabilidad se muestra en la Figura 4.3, este requiere como insumos la función de consecuencias, la carpeta que contiene la curva de fragilidad en formato separado por comas (csv) y una carpeta para ubicar el archivo de la curva de vulnerabilidad generado. Es importante mencionar que no se utilizó el programa VMTK para generar la totalidad de las curvas de vulnerabilidad ya que este programa se encuentra en desarrollo y tiene algunas limitaciones por la misma razón. Adicionalmente, Excel permitió realizar los cálculos de manera más ágil considerando que se generaron en total al menos 48 curvas de vulnerabilidad.

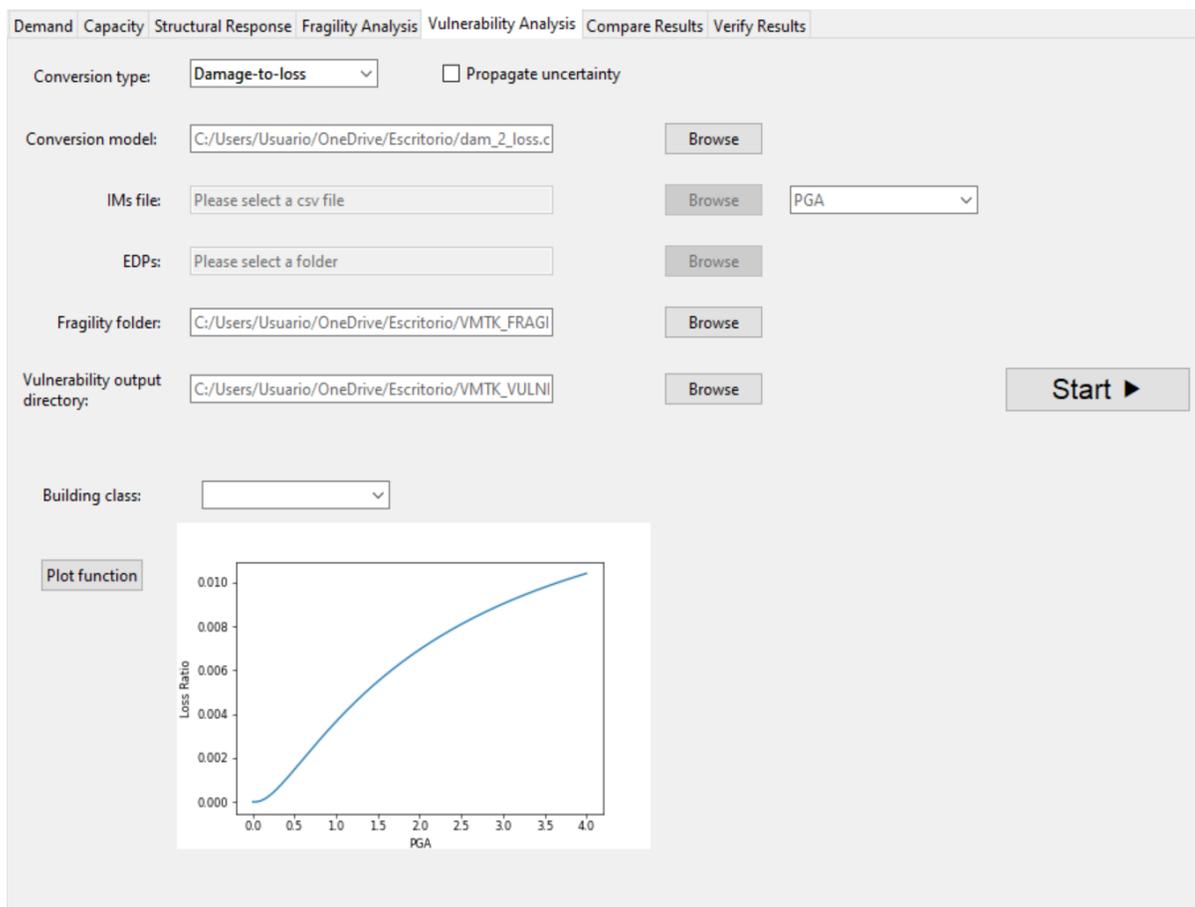


Figura 4.3. Módulo de vulnerabilidad del programa VMTK.

La comparación de resultados se realizó gráficamente y se muestra en la Figura 4.4, la curva de vulnerabilidad generada utilizando VMTK se encuentra justo sobre la que se generó utilizando Excel para todo el intervalo de intensidad sísmica, con lo cual se valida el resultado obtenido con Excel. Dicha revisión se realizó para tres casos diferentes, obteniendo el mismo resultado.

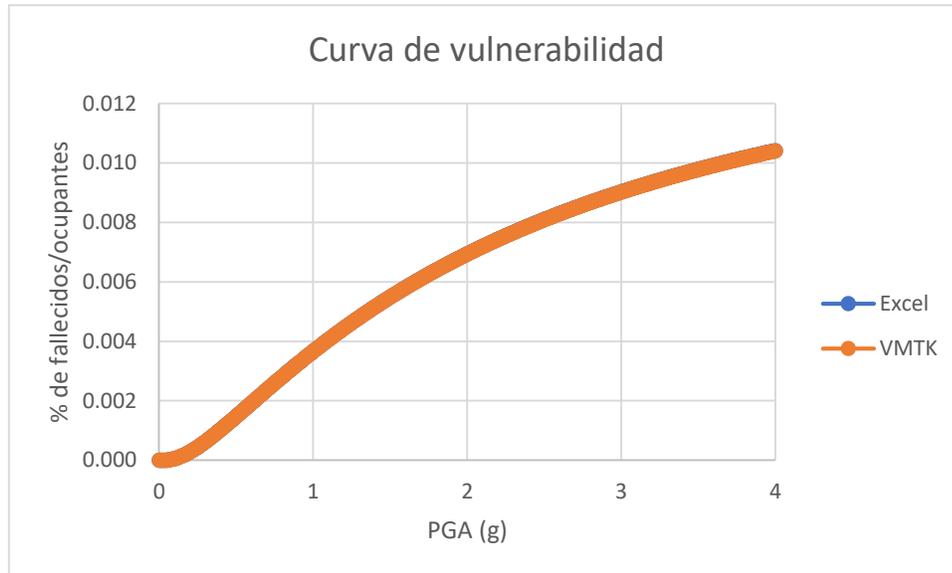


Figura 4.4. Gráfica de comparación de curvas de vulnerabilidad generadas utilizando Excel y el programa VMTK para la tipología CR_D_A.

4.2 Resultados

Utilizando el procedimiento descrito anteriormente, se generan curvas de vulnerabilidad para las 26 diferentes tipologías consideradas para el análisis del Cantón Central de San José. Además, para cada tipología se generan en promedio cuatro curvas de vulnerabilidad, variando los modelos de consecuencias, los cuales son los siguientes: FEMA (2020), Jaiswal y Wald (2010), So y Pomonis (2012) y Spence (2007).

En esta sección se presentan dos curvas de vulnerabilidad, una derivada de una metodología semi-empírica y la otra a una empírica, ya que se obtienen gráficas distintas en las curvas generadas.

La forma común de las curvas de vulnerabilidad se observa en la Figura 4.2, esta se produce al utilizar un modelo de consecuencias semi-empírico o analítico, en el cual, el valor de los factores de pérdidas aumentan según el estado de daño. Sin embargo, como se puede apreciar en dicha figura, para la estimación de víctimas se obtienen valores muy bajos.

Por otro lado, se tienen modelos de consecuencias derivados de métodos empíricos, estos en muchas ocasiones se derivan de observaciones y datos de terremotos en el pasado y se suelen aplicar directamente a la población total expuesta a la amenaza, es decir, sin considerar los diferentes estados de daño. En la Figura 4.5 se muestra la forma de la curva de vulnerabilidad con funciones de consecuencias derivadas por métodos empíricos. Como se puede observar, a partir de una intensidad de aproximadamente 0.3 g se incrementa pronunciadamente la relación de fallecimientos/ocupantes hasta estabilizarse en un valor de 6%. Pese a tratarse de métodos empíricos, la generación de estas curvas de vulnerabilidad permite obtener mayor precisión en las estimaciones debido a que se toma en cuenta todos los estados de daño de las estructuras.

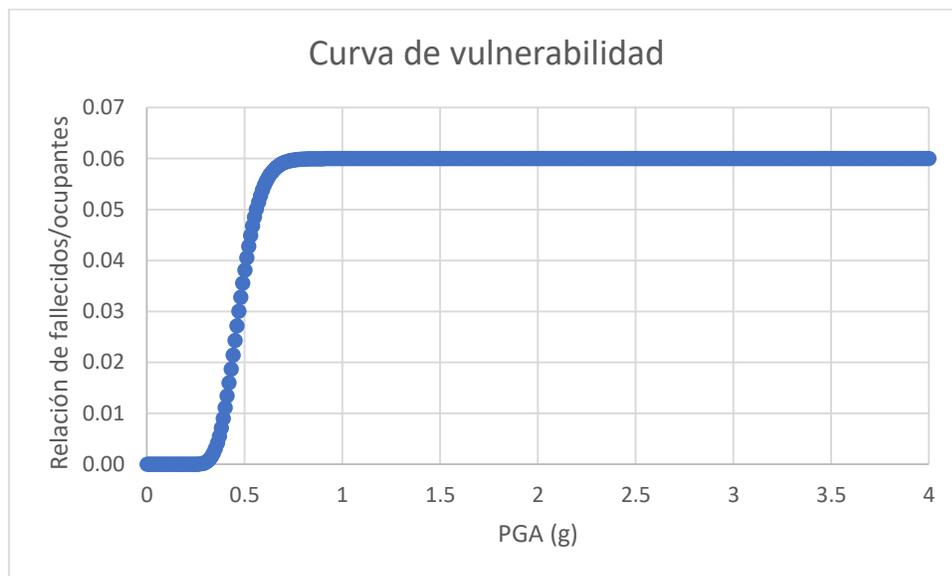


Figura 4.5. Curva de vulnerabilidad de la tipología MCF_1, aplicando el modelo de consecuencias Jaiwal y Wald (2010)

5 Caso de estudio

En este capítulo se presenta la comparación de pérdidas variando los modelos de consecuencias identificados en el capítulo anterior para el cantón Central de San José, a su vez se mantienen constantes los datos de amenaza, exposición y fragilidad para cuantificar el impacto únicamente de la variación de los modelos de consecuencias. Para los cálculos de riesgo sísmico se aborda una metodología determinista, la cual consiste en modelar una amenaza producida por una fuente determinada, en este caso se modela la falla de Cipreses la cual se describe a continuación.

5.1 Amenaza: Falla de Cipreses

La falla de Cipreses se ubica a 5 km al este de San José y forma parte del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica. Esta falla fue estudiada por Rodríguez et al. (2019) y lograron determinar el potencial sísmico máximo con una magnitud (M_w) que oscila entre 6.0 y 6.4 considerando una longitud de 14.1 km. Hasta la fecha de dicho estudio únicamente se relaciona un sismo a la falla de Cipreses, con una magnitud baja: 4.1, sin embargo, este generó una intensidad Macrosísmica de inclusive V en escala Mercalli Modificada (Wood y Neumann, 1931), por lo que representa una amenaza importante para el Cantón de San José debido a la cercanía y las propiedades geológicas, geomorfológicas y sismológicas identificadas.

Otro insumo que motivó a elegir esta falla corresponde al último estudio de desagregación sísmica (Hidalgo-Leiva et al., 2021), el cual concluyó que para el cantón Central de San José los sismos con mayor potencial de daño corresponden a eventos corticales, los cuales ocurren a distancias cercanas (menor a 15 km) y de magnitud alrededor de M_w 6.0. Como se mencionó anteriormente, para los cálculos de riesgo sísmico en este caso se eligió una metodología determinista, por lo que es de interés elegir un escenario de amenaza con un potencial de daño considerable.

A continuación, se presentan las características consideradas en el modelo de la amenaza, esto fue realizado por Moya (2020), investigador del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (Ver Figura 5.1):

- i. Magnitud: M_w 6.0.
- ii. Profundidad: 5 km.
- iii. Área de la falla: 10 km².

- iv. Software: Broadband Platform del Southern California Earthquake Center (SCE).
- v. Resultados: Aceleración esperada en 196 barrios del cantón central de San José.

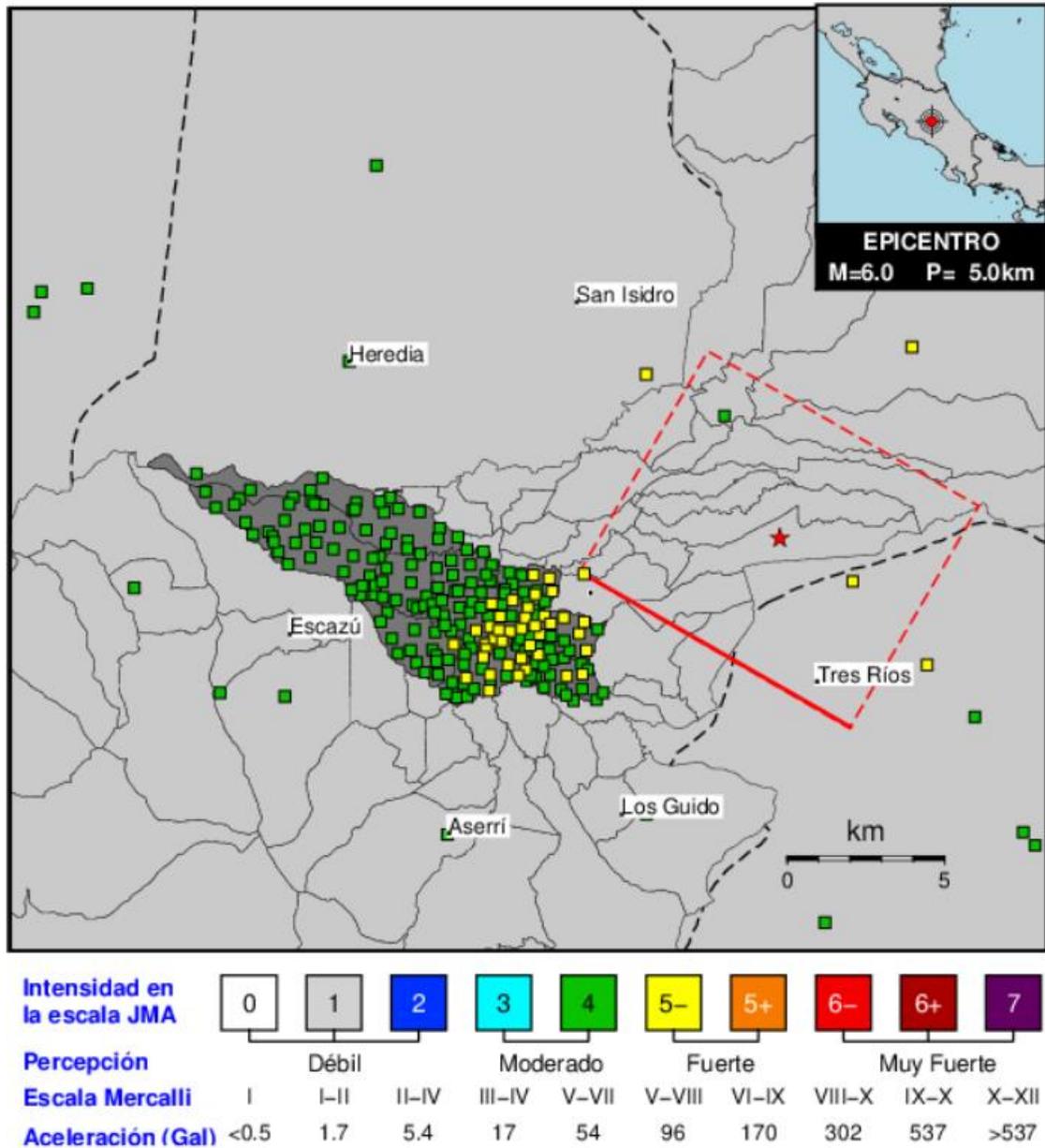


Figura 5.1. Ubicación de la falla y percepción de intensidad en 196 barrios del cantón Central de San José para el escenario planteado.

Fuente: LIS (2020)

5.2 Modelo de exposición

El modelo de exposición considerado fue realizado por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) de la Universidad de Costa Rica entre el año 2017 y 2019 y publicado por Esquivel-Salas L.C. et al. (2021). Este cuenta con un inventario de 64807 estructuras generadas a partir de una muestra de 7294 edificios ubicados en el cantón de San José, Costa Rica. El valor total del portafolio considerado corresponde a ₡9 907 823 783 000 colones y se estima una ocupación de 287 819 personas para el escenario nocturno. Además, se incluye información de cantidad de niveles, material, sistema estructural ante cargas laterales, regularidad, propiedades de techo y piso. Dicha caracterización se llevó a cabo basándose en imágenes panorámicas de los edificios (Esquivel-Salas, L. C. et al., 2021).

También, se incluye información de interés como: ubicación geográfica, área de la huella, fecha aproximada de construcción y el distrito y barrio en el que se ubica. Antes de estimar el costo de las estructuras, se realiza una extrapolación de los datos a 64807 estructuras definidas a partir de la muestra, para buscar representar el total de edificaciones del portafolio residencial. Para esto, se conoce el área total construida del Cantón de San José, y se asume que la distribución de las tipologías es igual a la encontrada en la muestra analizada. Posteriormente se estima el costo de cada edificio utilizando el Manual de valores base unitarios por tipología constructiva del Ministerio de Hacienda de Costa Rica (2019).

Como parte de este trabajo, se realizó una revisión exhaustiva de dicho modelo de exposición, iniciando por la revisión de los costos unitarios considerados, seguido del programa (código) utilizado para asignar el costo unitario a cada tipología correspondiente. Para ello, se generó un documento de Excel con información de 5312 edificios residenciales, se seleccionan al azar algunos edificios y se revisa nuevamente que los costos unitarios sean correctos. Finalmente, se cuenta con el modelo de exposición en formato lenguaje de marcado (.xml) para los cálculos de OpenQuake, esta versión ya cuenta con la extrapolación de datos que se mencionó anteriormente. En este punto se cuenta con los edificios agrupados por barrio, y se tienen sumatorias de áreas y costos unitarios, por lo que se revisan nuevamente los costos unitarios con respecto al archivo de Excel con los 5312 edificios, obteniendo que todos los valores comparados coinciden.

5.3 Modelo de fragilidad

Consiste en un grupo de funciones de fragilidad que describen el desempeño de las diferentes estructuras del portafolio residencial ante la acción sísmica. La mayoría de curvas de capacidad (utilizadas posteriormente para generar las curvas de fragilidad) consideradas en este estudio han sido generadas mediante análisis estáticos no lineales. Calderón (2018) realizó una recopilación de curvas de capacidad de estructuras diseñadas y analizadas para las condiciones de Costa Rica y se asociaron a diferentes tipologías constructivas presentes en el país. De igual manera, la generación de las curvas de fragilidad se basó en la tesis de maestría de Alejandro Calderón (2016), la tesis de maestría de Mabe Villar (2017) y la tesis de doctorado de Diego Hidalgo (2017).

5.3.1 Nivel 1: Taxonomía base agrupadas

Este nivel es el más general, en este se agrupan las tipologías de acuerdo a su principal material de construcción. Las clasificaciones son las siguientes:

- i. Concreto Reforzado
- ii. Mampostería
- iii. Estructuras metálicas
- iv. Madera
- v. Edificaciones informales

5.3.2 Nivel 2: Taxonomías base

Se agrupan las estructuras según su taxonomía base, esto quiere decir que además del material de construcción, se toma en cuenta el sistema sismorresistente, la altura del edificio, la rigidez del diafragma y la regularidad en planta y en altura. Se tienen 17 tipologías correspondientes a esta clasificación las cuales se presentan a continuación:

Cuadro 5.1. Tipologías base consideradas en el estudio

Código	Material	Sistema resistente a cargas laterales	Altura
MCR_1	Mampostería confinada reforzada	Muro	1 nivel
MCR_2	Mampostería confinada reforzada	Muro	2 o más niveles

MCF_1	Mampostería confinada	Muro	1 nivel
MCF_2	Mampostería confinada	Muro	2 o más niveles
CR_D_A	Concreto Reforzado	Dual	1-5 niveles
CR_D_B	Concreto Reforzado	Dual	6-10 niveles
CR_D_C	Concreto Reforzado	Dual	11 o más niveles
CR_I_A	Concreto Reforzado	Marco de concreto con relleno de mampostería	Altura: 1 nivel
CR_F_A	Concreto Reforzado	Marco	1 nivel
CR_F_B	Concreto Reforzado	Marco	6-10 niveles
CR_W_A	Concreto Reforzado	Muro	1 nivel
CR_W_C	Concreto Reforzado	Muro	11 o más niveles
S_F_C_A	Acero rolado en frío	Marco	1-5 niveles
S_F_C_B	Acero rolado en caliente	Marco	1-5 niveles
W_W_A	Madera	Muro	1 o 2 niveles
W_F_A	Madera	Marco	1 o 2 niveles
INFOR	Estructuras informales		

5.3.3 Nivel 3: Taxonomía

Este es el nivel más detallado de clasificación, en este caso se parte del nivel de clasificación anterior y considera el periodo de construcción de la estructura y el código sísmico vigente en dicha fecha. Se aplican tres clasificaciones (antes de código, código bajo y posterior al código), las cuales fueron determinadas por Blanco y Esquivel-Salas (2020). En total se generan 36 tipologías en esta clasificación, sin embargo, en el modelo de fragilidad actual no se toma en cuenta el periodo de construcción en las funciones de fragilidad. Esta clasificación se hizo pensando en el futuro para tomar dicha variable en cuenta.

5.4 Pérdidas económicas directas

En esta sección se presenta los resultados de pérdidas económicas utilizando el software OpenQuake versión 3.11.4. (GEM, 2020) En este caso se aplica el Cálculo de Daños por Escenario (Scenario Damage Calculator) denominado así por GEM, y cuenta con cuatro archivos principales: el campo de aceleración del suelo, el modelo de exposición, el modelo

de fragilidad y el modelo de consecuencias. Se obtiene como resultados: estadísticas de pérdidas, distribución de daño, mapas de pérdidas y de daño.

Se aplica dicho cálculo variando el modelo de consecuencias para un total de siete modelos de consecuencias de pérdidas económicas los cuales se presentaron en la sección 3.1 de este documento.

A continuación, se presentan los resultados de pérdidas económicas estimadas mediante los distintos modelos de consecuencias, así como la discusión de estos, enfocando la misma en el objetivo principal de este trabajo, el cual corresponde a determinar el impacto de los modelos de consecuencias en las evaluaciones de riesgo sísmico físico.

Para determinar el impacto de los modelos de consecuencias en las evaluaciones de riesgo sísmico físico, es importante conocer la distribución del daño en las estructuras, ya que como se ha explicado, los modelos de consecuencias dependen directamente del estado de daño de las estructuras. Debido a ello, se presenta primeramente la distribución de daño por edificaciones para la amenaza modelada.

Al observar la Figura 5.2 se aprecia como del escenario modelado, indiscutiblemente la gran mayoría (87%) de edificaciones no presentarían daño, por lo tanto, tampoco pérdidas económicas asociadas. Por otro lado, se tiene un 9% con daños ligeros, 3% con daños moderados, 1% con daños extensivos y 0.03% con colapso.

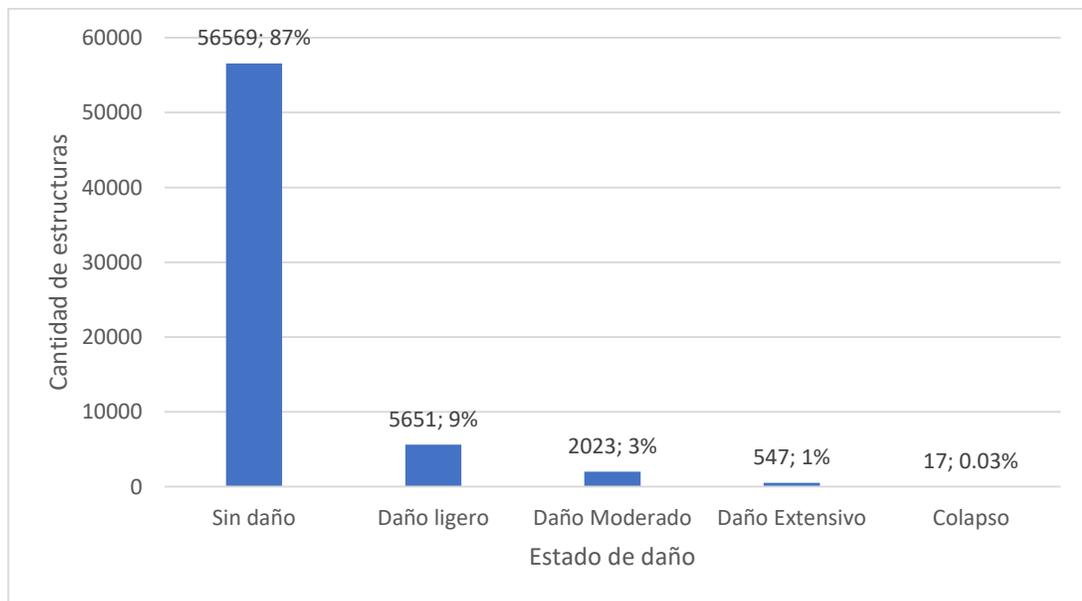


Figura 5.2. Distribución de estructuras según su estado de daño para la amenaza modelada.

A continuación se presenta el Cuadro 5.2 con el total de pérdidas estimadas en colones, dólares y relación de pérdidas con respecto al valor total del portafolio según las iniciativas consideradas. En dicho cuadro se presentan resultados muy puntuales, sin embargo, son importantes ya que en el caso de pérdidas económicas estos son los resultados finales de la evaluación de riesgo. En dicho cuadro, así como en la Figura 5.3, se puede observar como hay tres tendencias, un grupo conformado por cuatro modelos de consecuencias: FEMA (2020), FEMA (1999), Milutinovic y Trendafiloski (2003), y Kostov et al. (2004), que estiman las pérdidas en un rango ente ₡453 y ₡543 miles de millones de colones y un rango de pérdidas de 4.9% a 5.5% con respecto al valor total del portafolio; un segundo grupo de dos modelos de consecuencias: Yepes y Silva (2017), y Durukal et al. (2006), entre ₡764 y ₡821 mil millones de colones y una relación de pérdidas de 7.7% y 8.3% con respecto al valor total del portafolio respectivamente; finalmente se tiene el dato de la iniciativa de Bal et al. (2006), la cual estima una pérdida de ₡1 326 miles de millones de colones y pérdidas de 13.4% con respecto al valor total del portafolio. Seguidamente, se presenta el análisis de resultados cada uno de dichos grupos.

Cuadro 5.2. Pérdidas económicas estimadas y relación de pérdidas con respecto al valor total del portafolio según las iniciativas consideradas

Iniciativa	FEMA (2020)	Yepes y Silva (2017)	Bal et al. (2006)	Durukal et al. (2006)	Kostov et al (2004)	Milutinovic y Trendafiloski (2003)	FEMA (1999)
Total de pérdidas estimadas (miles de millones)	₡453	₡764	₡1 326	₡821	₡543	₡509	₡490
Total de pérdidas estimadas (millones de dólares americanos) ¹	\$ 714	\$1 203	\$2 089	\$1 293	\$ 856	\$ 801	\$ 771
Relación de pérdidas con respecto al valor total del portafolio	4.6%	7.7%	13.4%	8.3%	5.5%	5.1%	4.9%

1. Tipo de cambio 1\$=635 colones

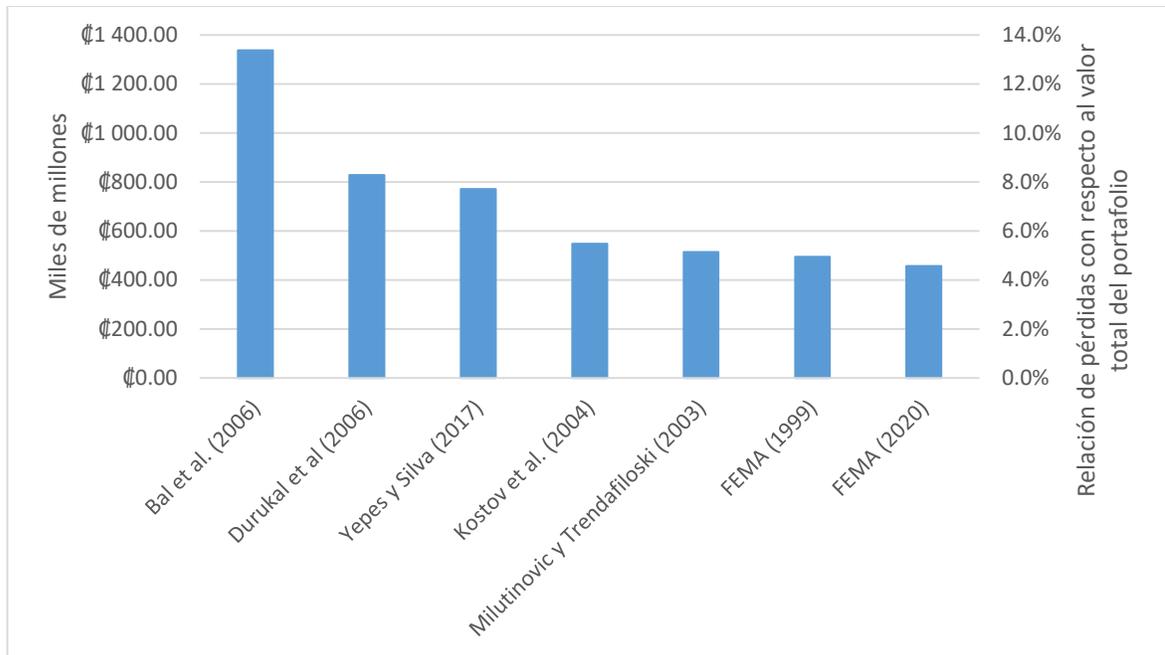


Figura 5.3 Gráfico de comparación de las pérdidas estimadas y la relación de dichas pérdidas con respecto al valor total del portafolio.

5.4.1 Grupo 1: FEMA (2020), FEMA (1999), Milutinovic y Trendafiloski (2003), y Kostov et al. (2003)

Al ver los factores propuestos por las iniciativas de este grupo, se observa algo muy interesante: en FEMA (1999) y FEMA (2020), únicamente varía el factor de daño extensivo de 50% a 44.7% respectivamente, ese pequeño cambio produce una diferencia de $\text{C}\$37$ mil millones de colones en el resultado final. Con esto se puede cuantificar el impacto que tienen los factores de pérdidas, en el que, para este caso una variación de 1% en el factor de pérdidas del estado de daño extensivo, produce una diferencia de $\text{C}\$7$ mil millones en las pérdidas totales. En la estimación total se produce una diferencia de 0.3% en la relación de pérdidas totales con respecto al valor total del portafolio, lo cual es equivalente a una diferencia de $\text{C}\$121.6$ mil millones de colones para un 1% de diferencia en la relación de pérdidas para estos modelos de consecuencias.

En el caso de los modelos FEMA (1999) con Milutinovic y Trendafiloski (2003), los factores de daño leve corresponden a 2% y 1% respectivamente, y en daño extensivo, 50% y 55% respectivamente. En este caso se produce una diferencia de $\text{C}\$19$ mil millones de colones, siendo la menor diferencia obtenida entre modelos distintos. En este caso se observa que, aunque la mayor cantidad de estructuras cuentan con daño ligero, la diferencia en los

factores es de solo uno por ciento, mientras que para daño extensivo la diferencia es de cinco por ciento y esta tiene mayor peso debido a que en este caso la estimación mayor corresponde a la iniciativa de Milutinovic y Trendafiloski (2003).

Al comparar la relación de pérdidas con respecto al valor total del portafolio, en el caso de FEMA (1999) se tiene un valor de 4.9%, mientras que para Milutinovic y Trendafiloski (2003) y tiene un valor de 5.1%, por lo que se obtiene una diferencia de ₡19 mil millones de colones en la estimación total para una variación de 0.2 % en la relación de pérdidas con respecto al valor total del portafolio, lo cual equivale a una diferencia de ₡95 mil millones para una variación de 1% en la relación de pérdidas para dichas iniciativas.

5.4.2 Grupo 2: Yepes y Silva (2017), y Durukal et al. (2006)

En este caso, se tienen diferencias en los factores de daño leve, moderado y extensivo, de los cuales se produce una diferencia total de ₡57 mil millones de colones. La determinación del impacto en este caso es más compleja ya que en el caso del daño leve y extensivo, la iniciativa de Durukal et al. (2006), propone factores de daño mayores, sin embargo, en el caso del estado de daño moderado, es mayor el factor propuesto por Yepes y Silva (2017).

La comparación de las estimaciones en dicho caso se realiza a partir de la relación de pérdidas totales con respecto al valor total del portafolio, ya que dicho dato considera tanto los factores aplicados según los distintos estados de daño, como el valor de reposición de las estructuras.

En el caso de Yepes y Silva (2017) se tiene una relación de pérdidas de 7.7% con respecto al valor total del portafolio, mientras que en el caso de Durukal et al. (2006), se obtiene una relación de pérdidas de 8.3%. Por lo que, si se considera dicha relación de pérdidas como el factor de pérdidas equivalente, debido a las consideraciones mencionadas anteriormente, se obtiene que para una diferencia de 0.6% en el factor equivalente se tiene una diferencia de ₡57 mil millones de colones en la estimación de pérdidas. O lo que sería equivalente también a una diferencia de ₡95 mil millones de colones para una diferencia de 1% entre estas iniciativas de riesgo sísmico.

5.4.3 Grupo 3: Bal et al. (2006)

En este caso se observa un valor muy alto: ₡1 326 miles de millones de colones, en comparación a los obtenidos con los demás modelos de consecuencias, sin embargo, era de

esperarse una estimación tan alta en este caso debido a los factores de pérdidas propuestos en dicha iniciativa.

Al observar la relación de pérdidas con respecto al valor total de portafolio se tiene un valor de 13.4%, siendo con diferencia el mayor de todos los factores calculados, esto se debe a que esta iniciativa fue propuesta para Turquía, y según la información publicada por Bal et al. (2006), existe una legislación en dicho país que establece que los edificios con daños extensivos y completos deben demolerse por lo tanto se considera el factor de pérdida como 100% en dichos casos y además, se considera un costo adicional correspondiente al manejo y disposición de escombros de dichas estructuras.

5.4.4 Según taxonomía

En la Figura 5.4 se presenta la distribución de pérdidas por grupos de taxonomía para los distintos modelos de consecuencias. Se puede observar la concentración de las pérdidas en los grupos de estructuras de concreto reforzado y mampostería, además, se comprobó que las pérdidas de dichos grupos de tipologías acaparan prácticamente el 100%, específicamente, concreto reforzado con 59% y mampostería con 41% del total de las pérdidas, mientras que se tienen proporciones mucho menores en los grupos de taxonomías: madera, estructuras metálicas y las informales. Estos resultados son congruentes con la información del área de construcción de los grupos de taxonomía. Donde, Mampostería: 11 006 860 m²; 78.64%, Concreto reforzado: 2 323 763 m²; 16.60%, Madera: 553 191 m²; 3.96%, Acero, 77 007 m²; 0.55% e Informales: 34 831 m²; 0.25%.

Con base en esos datos, se determina que el grupo de taxonomía más vulnerable a pérdidas económicas corresponde al grupo de estructuras de concreto reforzado: pérdida estimada $\$193000/m^2$ para el modelo Yepes y Silva (2017), mampostería: pérdida estimada $\$28000/m^2$ para el modelo Yepes y Silva (2017), estructuras metálicas: pérdida estimada $\$26000/m^2$ para el modelo Yepes y Silva (2017), estructuras de madera: pérdida estimada $\$2700/m^2$ para el modelo Yepes y Silva (2017) y estructuras informales: pérdida estimada $\$545/m^2$ para el modelo Yepes y Silva (2017). Se presentan los datos calculados para el modelo de Yepes y Silva (2017), sin embargo, se comprobó que para los demás modelos el orden de vulnerabilidad en términos relativos coincide con los datos presentados en esta sección.

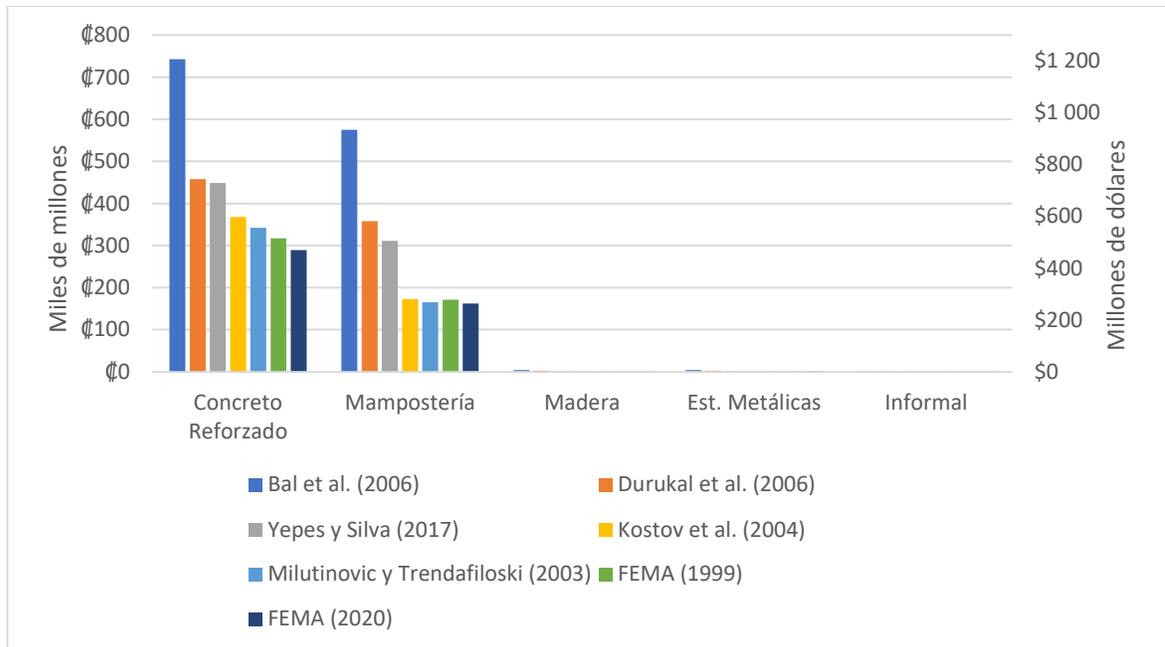


Figura 5.4. Distribución de pérdidas por grupos de taxonomía según los distintos modelos de consecuencias.

En la Figura 5.5 se presenta la distribución de las taxonomías con las cinco mayores pérdidas estimadas según los distintos modelos de consecuencias. Donde, CR_D_Cp: Estructuras de concreto reforzado, sistema sismorresistente tipo dual, de 11 o más niveles y construida antes del código sísmico, MCR_2p: Estructuras de mampostería confinada reforzada, sistema sismorresistente tipo muro, de 2 o más niveles y construida antes del código sísmico, MCR_2l: Estructuras de mampostería confinada reforzada, sistema sismorresistente tipo muro, de 2 o más niveles y construida con un nivel técnico bajo según el código sísmico, CR_D_Cl: Estructuras de concreto reforzado, sistema sismorresistente tipo dual, de 11 o más niveles y construida con un nivel técnico bajo según el código sísmico, CR_F_Cp: Estructuras de concreto reforzado, sistema sismorresistente tipo marco, de 11 o más niveles y construida antes del código sísmico. Se puede observar un resultado congruente con lo observado en el caso de las pérdidas por grupos de taxonomía en el que las pérdidas se concentran en las estructuras de concreto reforzado y mampostería. Por otro lado, se aprecia como también se mantiene la tendencia en las iniciativas de riesgo sísmico en las que los mayores valores estimados corresponden a Bal et al. (2006) y los menores a FEMA (2020).

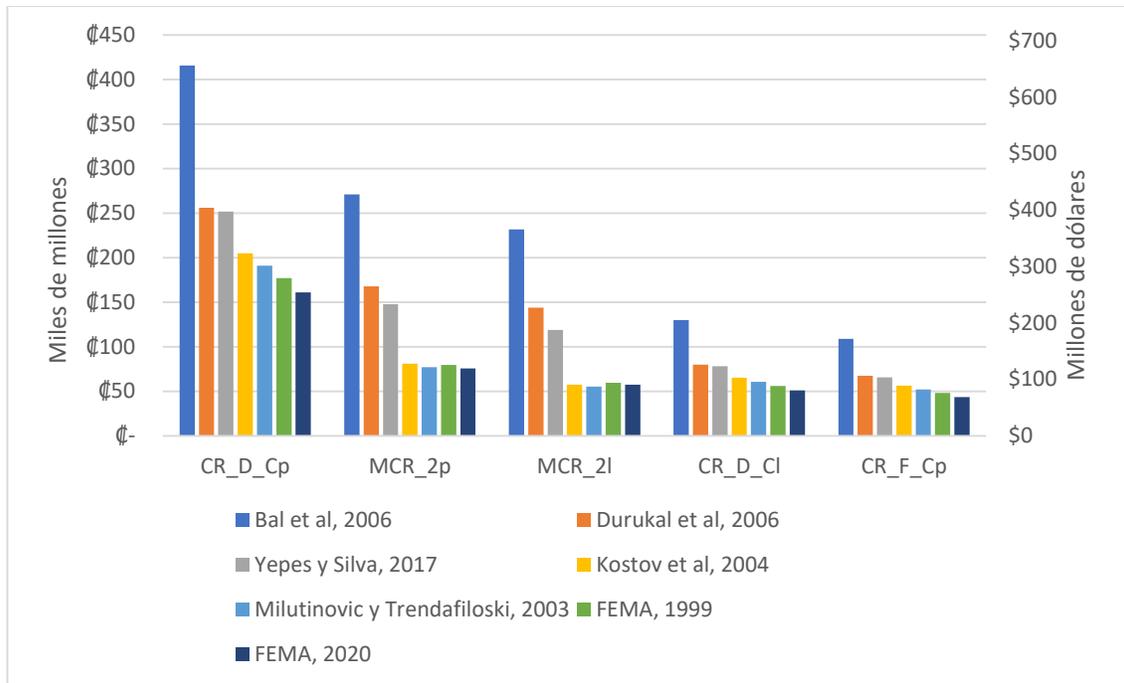


Figura 5.5. Distribución de las taxonomías con las cinco mayores pérdidas estimadas según los distintos modelos de consecuencias.

En la Figura 5.6 se presenta la distribución de los distritos con las cuatro mayores pérdidas estimadas según los distintos modelos de consecuencias. Como se observa para estos cuatro distritos se mantiene la tendencia para todos los modelos de consecuencias, sin embargo, se observa que para los distritos de Hospital y Zapote se marca menos la diferencia entre las iniciativas de riesgo sísmico, por lo que se puede esperar que a partir del cuarto puesto se observen diferencias en el orden de las estimaciones para los distritos. Lo mencionado anteriormente se pudo comprobar en la hoja de cálculo de Excel, sin embargo no se pudo presentar en la Figura 5.6 por motivo de cantidad de información. La distribución porcentual de las pérdidas por distrito se mantiene para los distintos modelos de consecuencias.

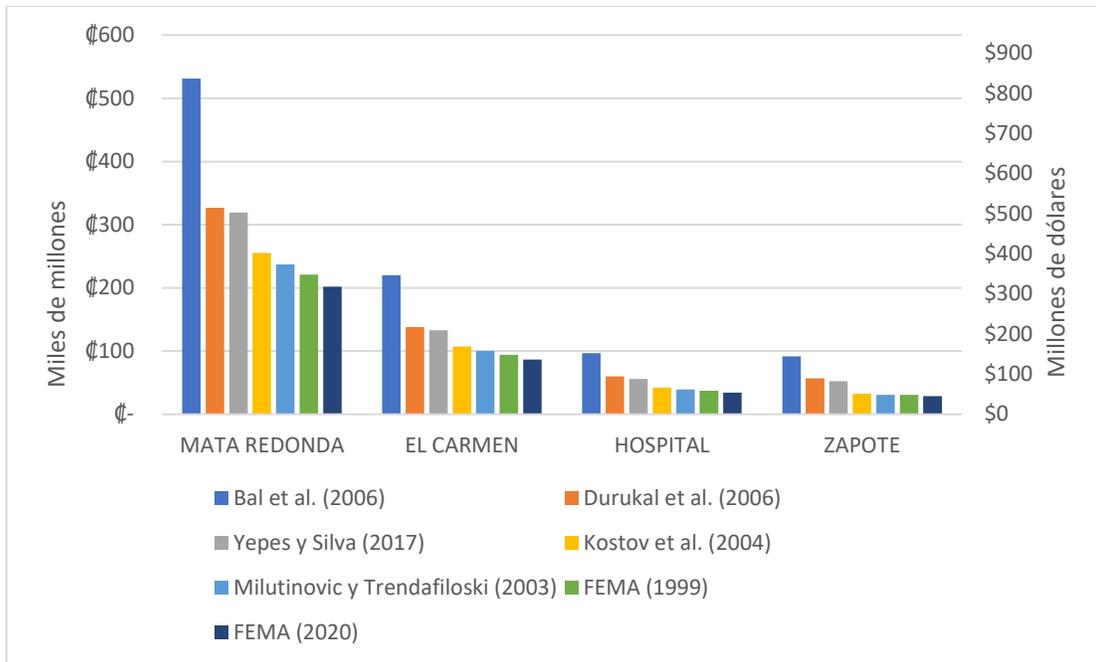


Figura 5.6. Distribución de los distritos con las cuatro mayores pérdidas estimadas según los distintos modelos de consecuencias.

En la Figura 5.7 se observa la distribución de pérdidas por distritos para el modelo de consecuencias Yepes y Silva (2017). Se elige dicho modelo de consecuencias primeramente debido a que este presenta un resultado de pérdidas intermedio, además, como se mencionó en el Capítulo 3, este modelo fue generado para su utilización en países de América del Sur, que se podría considerar que tienen condiciones y prácticas constructivas similares a Costa Rica.

En este caso, los distritos con mayores pérdidas económicas serían Mata Redonda (42%), El Carmen (17%), Zapote y Hospital (7% cada uno). Es importante mencionar que la distribución geográfica de pérdidas es variable según el modelo de consecuencias, ya que como se observó anteriormente los factores de pérdidas varían según los modelos de consecuencias por lo que en algunos casos se generan mayores pérdidas en barrios y distritos con estructuras primordialmente con daños ligeros, moderados o extensivos. Esto se puede apreciar de mejor manera en los mapas de las pérdidas ubicadas por barrios para todos los modelos de consecuencias considerados.

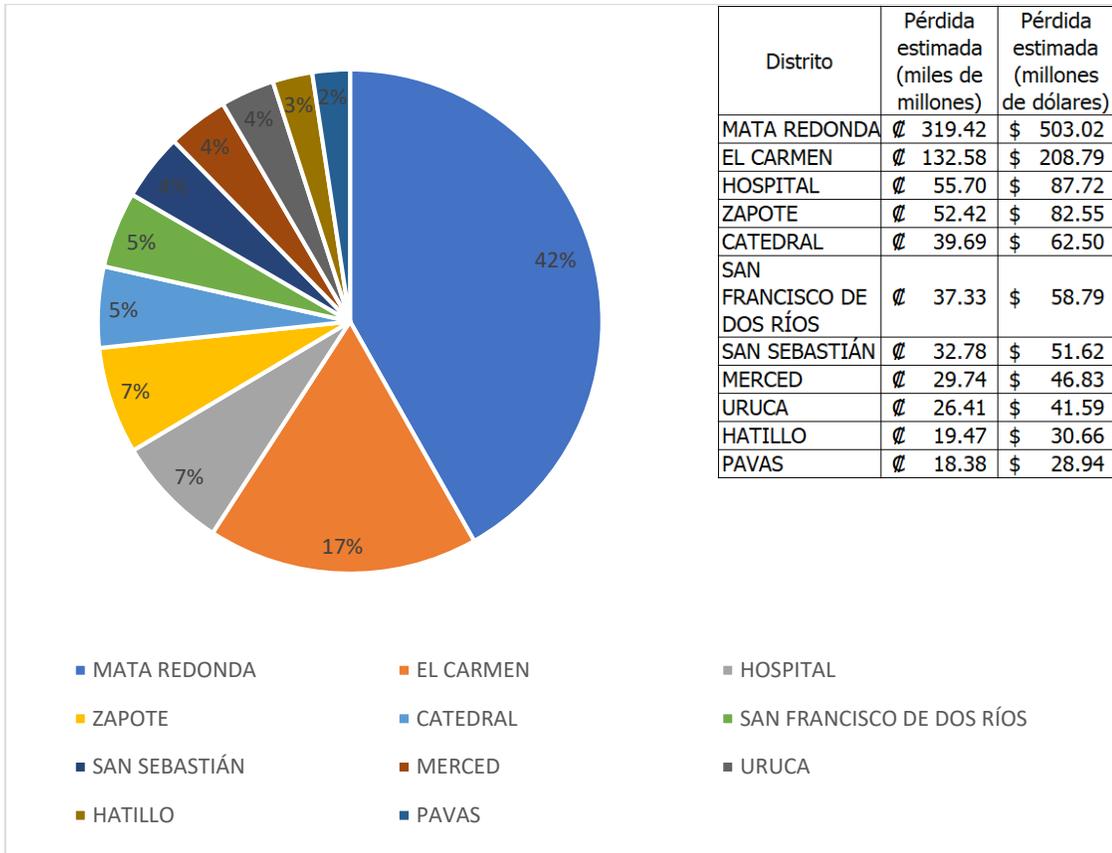


Figura 5.7. Distribución de pérdidas por distritos para el modelo Yepes y Silva (2017).

En la Figura 5.8 se presenta el mapa de pérdidas por barrios para el modelo de consecuencias de Yepes y Silva (2017). En este caso se tiene que el barrio con mayor pérdida sería el barrio Américas con una pérdida de ₡218 mil millones de colones, seguido de El Carmen con una pérdida de ₡84 mil millones de colones y en tercer lugar el barrio Rohrmoser con una pérdida de ₡76 mil millones de colones. Este resultado es especialmente útil ya que permite identificar la distribución geográfica de las pérdidas económicas, con lo cual se logra la identificación de las estructuras más vulnerables y permite la toma de decisiones con base a información objetiva para reducir el impacto de un potencial terremoto.

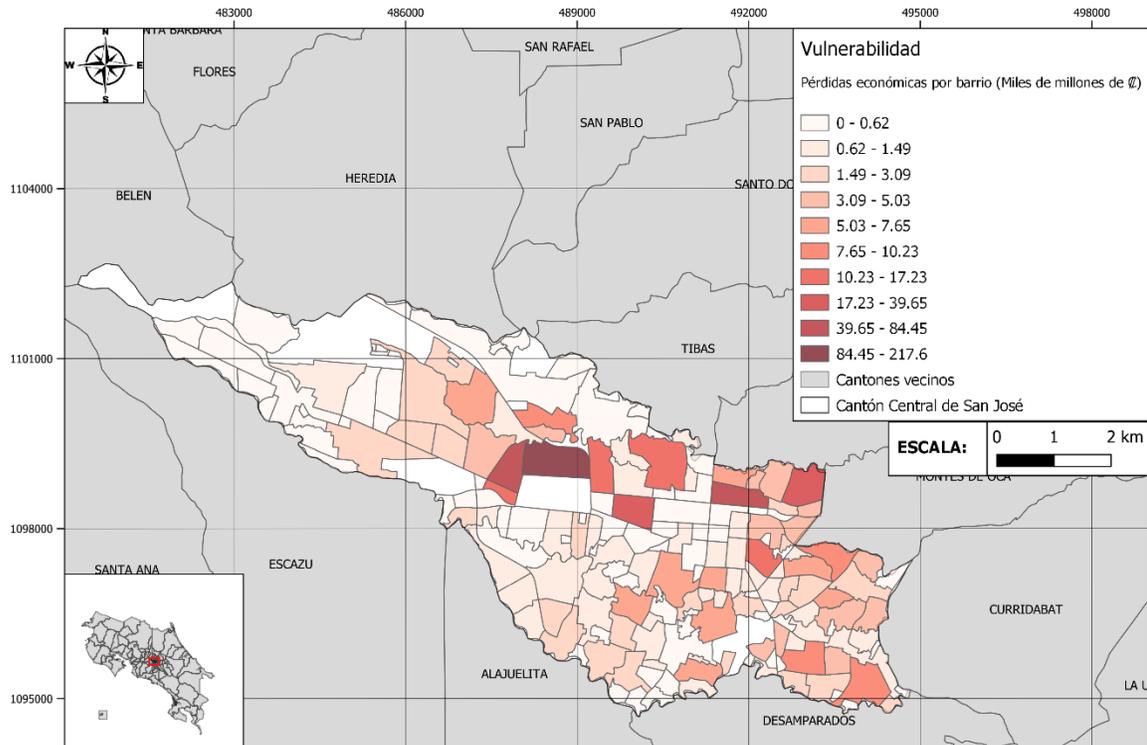


Figura 5.8. Mapa de pérdidas por barrios del cantón Central de San José para el modelo propuesto por Yepes y Silva (2017).

5.5 Víctimas

En esta sección se presentan los resultados de la estimación de víctimas, en este caso se enfoca la estimación en las potenciales muertes para la amenaza de la falla de Cipreces descrita anteriormente, enfocado en el escenario nocturno. De los cinco modelos de consecuencias identificados para este tipo de pérdidas: FEMA (2020), Miyamoto (2016), Spence (2007), Jaiswal y Wald (2010), y So y Pomonis (2012), se realizan cuatro estimaciones ya que en el caso de Spence (2007) se enfoca en edificaciones de concreto reforzado únicamente y se complementa con la iniciativa de So y Pomonis (2012) y FEMA (2020). La primera propone factores para las tipologías de mampostería, y para las tipologías de acero, madera e informal se estima con los factores de FEMA (2020).

Para realizar la estimación de víctimas fue necesario generar curvas de vulnerabilidad ya que la versión 3.11.4 (GEM, 2020) de OpenQuake no admite el uso directo de funciones de consecuencias para este tipo de pérdidas. Dicho cálculo se conoce como Calculadora de Escenarios de Riesgo (Scenario Risk Calculator) y requiere como insumo el archivo con los

campos de movimiento del suelo, el modelo de exposición y el de vulnerabilidad. Este cálculo tiene como salidas la estimación de víctimas y los mapas con la distribución espacial de las mismas.

Luego de generar las curvas de vulnerabilidad con el procedimiento descrito en el capítulo 4, se generó el archivo de las curvas de vulnerabilidad, para ello se utiliza la pestaña “tools” de OpenQuake, luego se selecciona “Vulnerability”. En dicha pestaña se debe agregar una por una las 36 tipologías consideradas en este estudio, y agregar pares ordenados de intensidad, su correspondiente factor de pérdida asociado y el coeficiente de variación de los factores de pérdidas, estos salen de la curva de vulnerabilidad y para cada curva se seleccionan 13 pares ordenados. A manera de ejemplo se muestra a continuación la información de la tipología CR_D_A (Estructura de concreto reforzado, con sistema sismorresistente tipo dual y altura de 1-5 niveles) y la iniciativa FEMA (2020) requerida por OpenQuake para generar el archivo de vulnerabilidad, para la medida de intensidad PGA en unidades de aceleración (g).

Cuadro 5.3. Información de la tipología CR_D_A y la iniciativa FEMA (2020) requerida por OpenQuake para generar el archivo de vulnerabilidad

Medida de intensidad	Factor de pérdida	Coefficiente de variación
0.0001	0.00E+00	0
0.2001	2.82E-04	0
0.4001	1.04E-03	0
0.6001	1.93E-03	0
0.8001	2.82E-03	0
1.0001	3.67E-03	0
1.2001	4.45E-03	0
1.4001	5.16E-03	0
1.6001	5.81E-03	0
1.8001	6.41E-03	0
2.0001	6.95E-03	0
3.0001	9.03E-03	0
4	1.04E-02	0

Como parte del procedimiento, también fue necesario generar una equivalencia entre las tipologías consideradas para Costa Rica y las tipologías propuestas por las iniciativas

identificadas, esto para asignar los factores de pérdidas de la manera más adecuada. Se propone la equivalencia que se presenta en el Apéndice A.

En el caso de FEMA (2020), se utilizó el documento de Brzev et al. (2013). Donde se presenta un informe del desarrollo y aplicaciones de la taxonomía de edificios para la iniciativa GEM, así como las equivalencias a otras iniciativas como HAZUS (FEMA, 2020) y PAGER (Jaiswal y Wald, 2010). Es importante mencionar que para la clasificación de las diferentes tipologías constructivas costarricenses se utilizó el formato de la fundación GEM, por lo que esto facilitó la generación de la equivalencia de cada una. En el caso de Jaiswal y Wald (2010) aunque el aporte de ellos forma parte del proyecto PAGER (Jaiswal y Wald, 2010), no se proponen factores de pérdidas para todos los tipos de construcciones por lo que en este caso se asigna de acuerdo a la descripción presentada en la publicación de Jaiswal y Wald, buscando la mayor similitud con las tipologías consideradas en este estudio.

Por otro lado, se tiene la iniciativa de Spence (2007), que se enfoca en las víctimas en estructuras de concreto reforzado, por lo que se aplica en dichas estructuras. En el caso de So y Pomonis (2012) se aplica el mismo criterio mencionado anteriormente en el caso de Jaiswal y Wald, al igual que en el caso de Miyamoto (2016). Sin embargo, en este último fue más sencillo ya que como se mencionó anteriormente dicho estudio fue desarrollado para Costa Rica por lo que la mayoría de las tipologías consideradas fueron análogas a las consideradas en este estudio.

A continuación, se presentan los resultados de los cuatro escenarios de estimación de víctimas, específicamente muertes para el escenario nocturno. Para cada caso se presenta el mapa con la distribución geográfica esperada de las pérdidas.

En la Figura 5.9 se presenta la estimación de muertes debido los distintos casos considerados, como se puede observar existe una gran dispersión de los resultados obtenidos. Por un lado, se tiene el caso de FEMA (2020) con el valor más bajo correspondiente a 9 víctimas mortales, seguido de Miyamoto (2016) con una estimación de 23 víctimas. En ambos casos se trata de metodologías semi-empíricas y los factores se han derivado de observaciones y estadísticas de terremotos ocurridos en el pasado. En el caso de las pérdidas humanas es sumamente importante considerar que los factores se generan en función de la vulnerabilidad de la zona para la cual se realiza la iniciativa, por lo tanto, los resultados van a reflejar un comportamiento de acuerdo a dicha variable. Por otro lado,

se tiene la estimación de Jaiswal y Wald (2010) y So y Pomonis (2012) con Spence (2007), dichas iniciativas a excepción de Spence (2007) han sido derivadas utilizando métodos empíricos, además para lugares con una vulnerabilidad muy alta ante terremotos por lo tanto era de esperar que los valores fueran mayores en comparación a las iniciativas semi-empíricas.

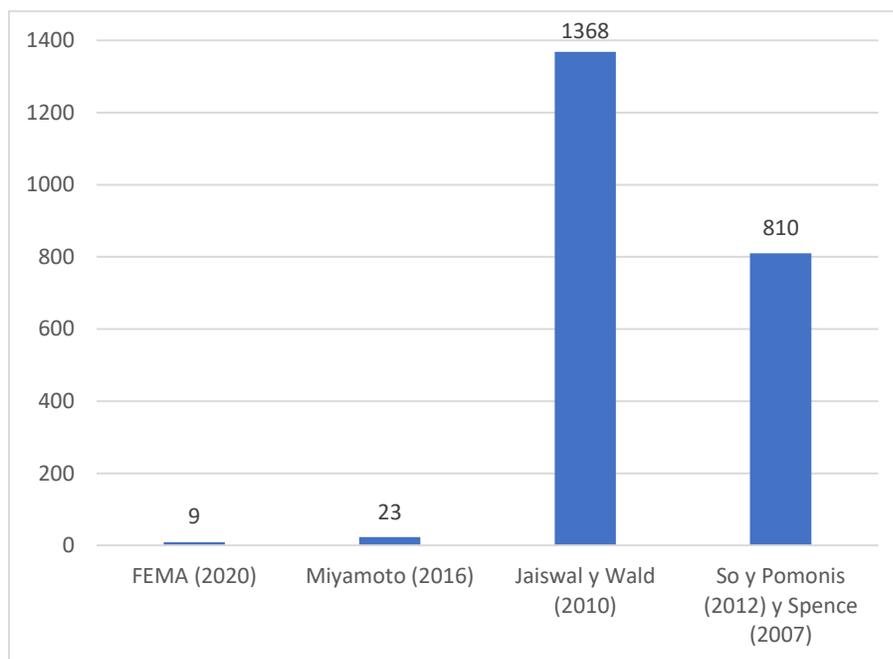


Figura 5.9. Estimación de muertes según los distintos modelos de consecuencias.

Con respecto al impacto de los modelos de consecuencias en la estimación de víctimas, se puede observar que existe una variación alta al igual que la observada en el caso de pérdidas económicas. Por ejemplo, en el caso de las pérdidas económicas se observó cómo al variar un punto porcentual en el factor de pérdidas de daño extensivo, el resultado final varió hasta \$121.6 mil millones. En el caso de las víctimas, entre los factores utilizados por la iniciativa FEMA (2020) y Miyamoto (2016), se aumenta en 20% los utilizados en la iniciativa de Miyamoto (2016) con respecto a FEMA (2020), y como se pudo observar, la estimación aumentó en 14 muertes correspondiente a un aumento del 255% en la estimación final. A continuación, se presentan y discuten los resultados de la estimación de cada iniciativa para la estimación de víctimas identificada.

5.5.1 FEMA (2020)

En la Figura 5.10 se observa la distribución de muertes esperadas según el modelo FEMA (2020), como se mencionó anteriormente, en este caso se obtiene una estimación de 9 víctimas mortales para todo el cantón por lo que no se presentan concentraciones importantes y por el contrario se distribuyen entre los distintos barrios, sin embargo se observa que los tres barrios que tienen mayor vulnerabilidad corresponden a Paso Ancho (0.55), Moreno Cañas (0.51) y Cristo Rey (0.49). De igual manera se comprobó que las tipologías con mayor vulnerabilidad corresponden a W_W_Ap: estructura de madera con sistema sismorresistente tipo muro y de 1-2 niveles (4.84), W_W_AI: estructura de madera con sistema sismorresistente tipo muro y de 1-2 niveles (1.10) y MCR_2P: estructura de mampostería confinada reforzada con sistema sismorresistente tipo muro y de 2 o más niveles (0.75).

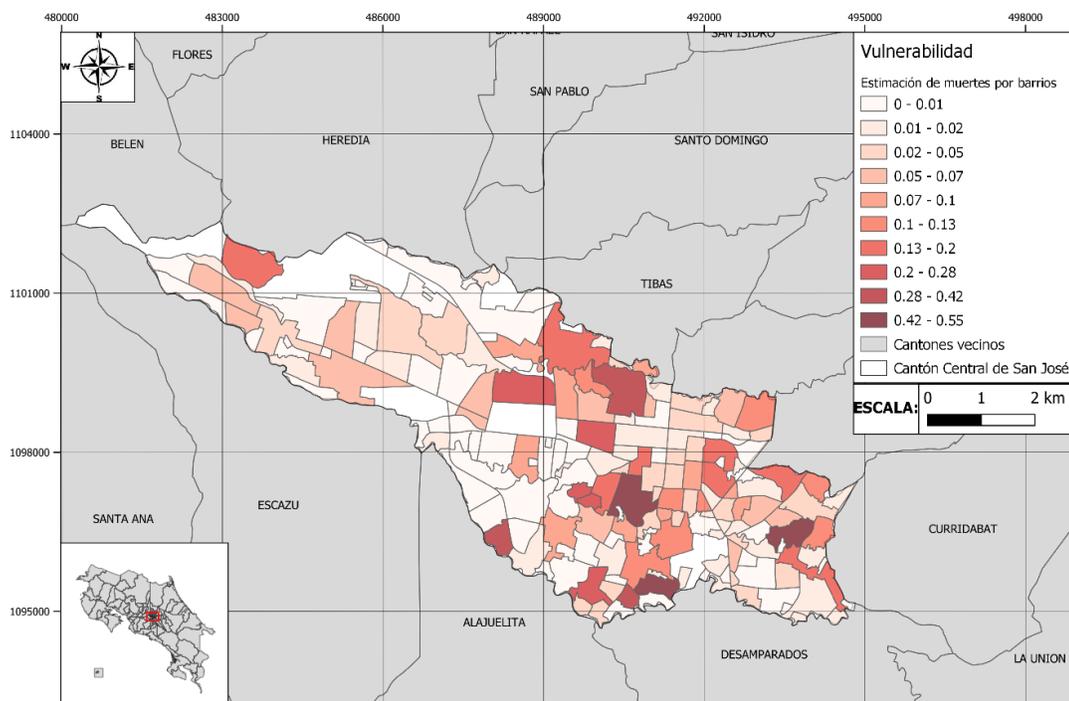


Figura 5.10. Mapa con distribución de muertes esperadas por barrios utilizando el modelo de consecuencias FEMA (2020).

5.5.2 Miyamoto (2016)

En la Figura 5.11 se muestra la distribución de muertes esperadas según el modelo Miyamoto 2016, como se puede apreciar la distribución por barrios es idéntica a la obtenida

para el modelo FEMA (2020), sin embargo en este caso se estima un total de 23 víctimas mortales. En este caso los tres barrios con mayor vulnerabilidad corresponden a Paso Ancho (1.40), Moreno Cañas (1.29) y Cristo Rey (1.23), se observa la misma tendencia al caso anterior, aunque los valores son mayores lo cual es congruente con los factores de pérdidas utilizados en este caso. Las tipologías con mayor vulnerabilidad corresponden a W_W_Ap: estructura de madera con sistema sismorresistente tipo muro y de 1-2 niveles (12.31), W_W_Al: estructura de madera con sistema sismorresistente tipo muro y de 1-2 niveles (2.80) y MCR_2P: estructura de mampostería confinada reforzada con sistema sismorresistente tipo muro y de 2 o más niveles (1.60).

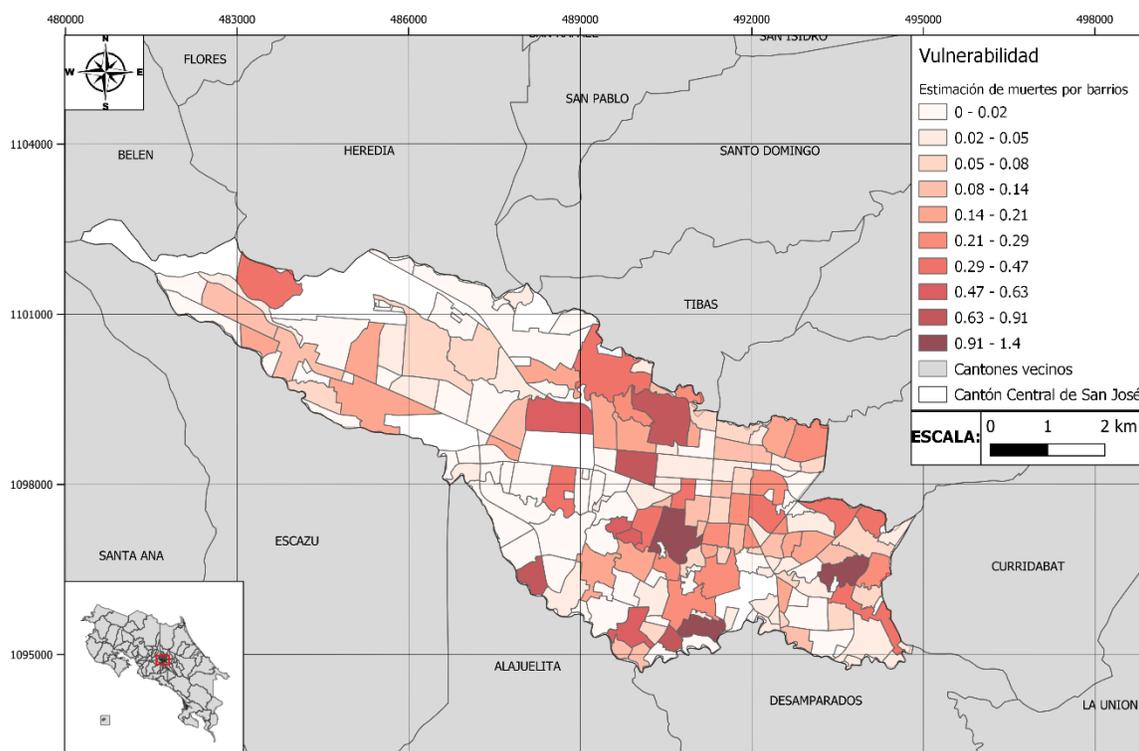


Figura 5.11. Mapa con distribución de muertes esperadas por barrios utilizando el modelo de consecuencias Miyamoto (2016).

5.5.3 Jaiswal y Wald (2010)

En la Figura 5.12 se aprecia la distribución de muertes esperadas según el modelo Jaiswal y Wald, 2010. La estimación de víctimas utilizando esta iniciativa corresponde a 1368. Con respecto a la vulnerabilidad de los barrios, en este caso se observa que los barrios con

mayores pérdidas corresponden a Morenos (117), San Bosco (108), Américas (86) y Hatillo 5 (80). Las tipologías con mayor vulnerabilidad en este caso corresponden a MCR_2p: estructura de mampostería confinada reforzada con sistema sismorresistente tipo muro y de 2 o más niveles (338), MCR_2I: estructura de mampostería confinada reforzada con sistema sismorresistente tipo muro y de 2 o más niveles (321) y CR_D_Cp: estructura de mampostería confinada reforzada con sistema sismorresistente tipo dual y de 11 o más niveles (163).

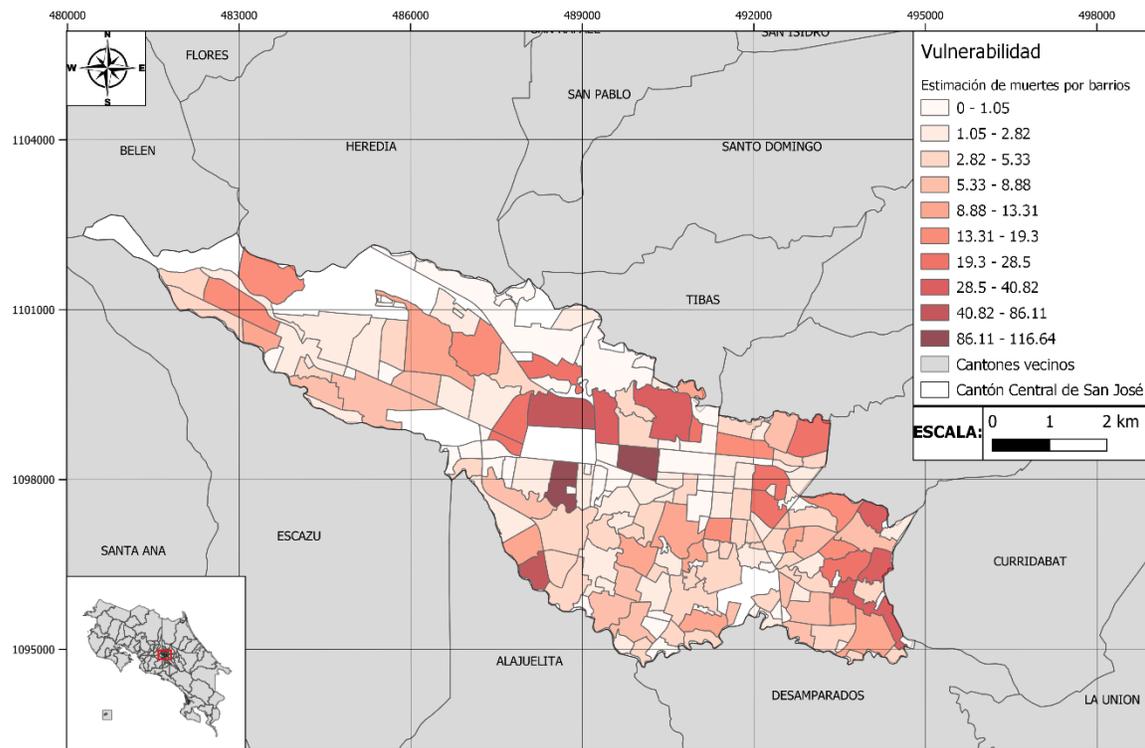


Figura 5.12. Mapa con distribución de muertes esperadas por barrios utilizando el modelo de consecuencias Jaiswal y Wald (2010).

Como se mencionó anteriormente la estimación de víctimas utilizando esta iniciativa corresponde a 1368, este es un valor muy alto el cual no es congruente con los datos y víctimas observadas en terremotos ocurridos en Costa Rica en el pasado (ver Cuadro 1.1), sin embargo, es importante recalcar que los factores propuestos en dicha iniciativa se basan en estudios anteriores los cuales recopilan información de fatalidades en terremotos importantes alrededor del mundo, por lo tanto la vulnerabilidad de dichas zonas no es precisamente la misma que la de Costa Rica, por otro lado, lo mismo sucede con las tipologías constructivas ya que las prácticas constructivas son variables de país en país, y

en este caso se realizó la equivalencia entre tipologías lo más similares posibles, sin embargo, no exactamente las mismas.

5.5.4 So y Pomonis (2012) con Spence (2007)

En la Figura 5.13 se aprecia la distribución de muertes esperadas según los modelos So y Pomonis (2012) con Spence (2007), en este caso la estimación total de víctimas corresponde a 810. Los tres barrios con mayores pérdidas corresponden a San Francisco de Dos Ríos (48), Gloria (39) y México (37). Las tipologías con mayor vulnerabilidad en este caso corresponden a MCR_2p: estructura de mampostería confinada reforzada con sistema sismorresistente tipo muro y de 2 o más niveles (394), MCR_2l: estructura de mampostería confinada reforzada con sistema sismorresistente tipo muro y de 2 o más niveles (375) y MCF_2p: Mampostería confinada con sistema sismorresistente tipo muro y de 2 o más niveles (10).

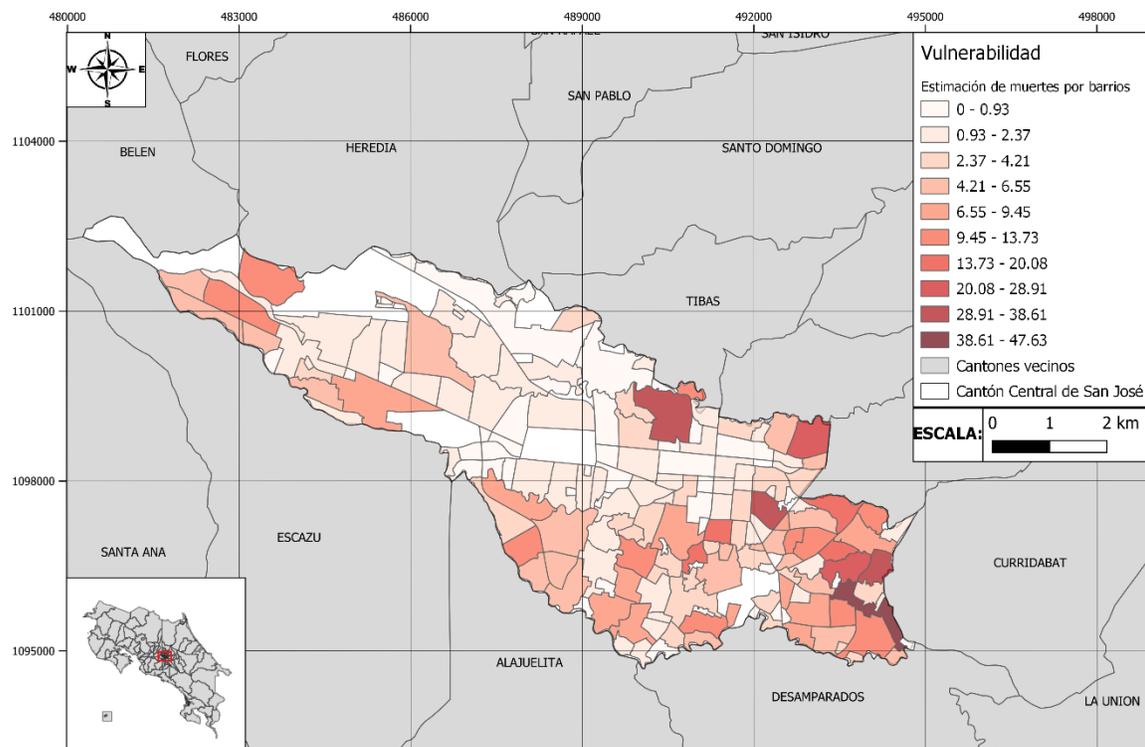


Figura 5.13. Mapa con distribución de muertes esperadas por barrios utilizando el modelo de consecuencias So y Pomonis (2012) y Spence (2007)

En este caso se observa un comportamiento similar al anterior (Jaiswal y Wald, 2010), con una estimación alta la cual no es congruente con los eventos ocurridos en el país hasta la

fecha, en este caso se combina una iniciativa derivada de una metodología empírica (So y Pomonis, 2012) con una semi-empírica (Spence, 2007), por lo que se obtiene una estimación alta, sin embargo, menor en comparación con el caso anterior.

5.6 Escombros

En esta sección se presentan los resultados de la estimación de escombros. A diferencia de las estimaciones de pérdidas económicas y víctimas, en las cuales se utilizó OpenQuake para realizar los cálculos, en este caso se utilizaron los datos del mismo modelo de exposición y a partir de la distribución de los daños estimados con OpenQuake se utiliza una hoja de cálculo para estimar el volumen de escombros (m^3) según taxonomía, taxonomía base, taxonomías base agrupadas, barrio y distrito.

Para el presente caso se aplica la estimación de escombros a las estructuras con estado de daño extensivo (547 estructuras) y colapso (17 estructuras) correspondientes al escenario de amenaza de la falla de Cipreces. Se determina aplicar el cálculo en dichos estados de daño primeramente porque el objetivo de esta investigación es comparar los resultados de las iniciativas identificadas, en el caso FEMA (2020), esta iniciativa propone factores para estimación de escombros para todos los estados de daño considerados, mientras que en el caso de Miyamoto (2016) se enfoca en el estado de daño completo, por lo que al considerar más estados de daño aumentaría la diferencia. Además, se determina que las estructuras con daño extensivo en la mayoría de casos no serían reparadas debido precisamente al importante daño que presentan por lo que, aunque no serían escombros que se deban acarrear y depositar de emergencia, estos también se deben considerar.

Como se mencionó anteriormente, en el caso de la iniciativa FEMA (2020), la estimación de escombros se realiza en unidad de peso a partir de área de construcción (toneladas cortas/1000 ft^2), por lo que para obtener datos comparables en unidades de volumen (m^3), se obtiene un dato de densidad de escombros mixtos con un valor de $910 \text{ kg}/m^3$ el cual fue obtenido a partir de mediciones de campo de residuos de construcción y demoliciones de distintos materiales en Estados Unidos (Haselbach y Bruner, 2006).

En la Figura 5.14 se puede apreciar la comparación de la estimación total de escombros según las dos iniciativas consideradas, desglosado por escombros debido a estructuras con

daño extensivo y daño completo. En el caso de Miyamoto (2016) se tiene una estimación total de 728 359 m³ lo cual equivale a aproximadamente 216 piscinas olímpicas de material de escombros, de los cuales 5 905 m³ (0.8%) corresponden a escombros debido a daño completo y 722 454 m³ (99.2%) correspondiente a escombros debido a daño extensivo. Por otro lado, a partir de la iniciativa FEMA (2020) se obtiene una estimación total de 331 779 m³ lo cual equivale a 98 piscinas olímpicas, de los cuales 4 568 m³ (1.4%) corresponden a escombros debido a daño completo y 327 210 m³ (98.6%) correspondiente a escombros debido a daño extensivo.

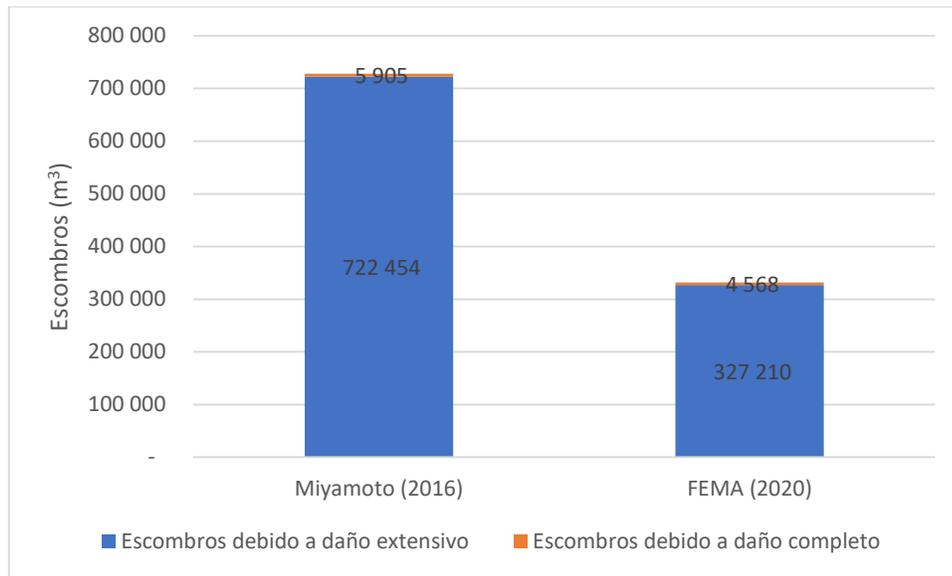


Figura 5.14. Estimación de escombros según la iniciativa Miyamoto (2016) y FEMA (2020)

De los resultados obtenidos se puede observar que la estimación de FEMA (2020) es menor tanto para los escombros debido a daño extensivo como a los debidos a daño completo, sin embargo, la mayor diferencia se presenta en el daño extensivo, esto en parte se debe a que la metodología FEMA (2020) no considera el 100% de los escombros para dicho caso como sí lo hace Miyamoto (2016), sino que considera una parte del total que varía entre 25% y 60% para las clasificaciones de escombros propuestas en dicha iniciativa. Precisamente realizando un cálculo sencillo se puede determinar el factor (x_1) que se debería aplicar a la estimación de escombros debido a daño extensivo de Miyamoto (2016) para obtener el valor estimado por FEMA (2020).

$$722\,454 * x_1 = 327\,210$$

$$x_1 = 0.4529$$

$$x_1 = 45.29\%$$

Como se observa en el cálculo presentado, la estimación de FEMA (2020) para escombros debidos a daño extensivo es 45.29% con respecto a la estimación de Miyamoto (2016). En el caso de los escombros debidos a daño completo se presenta la misma tendencia, sin embargo, en este caso la estimación de FEMA (2020) es 77.36% con respecto a la estimación de Miyamoto (2016).

En la Figura 5.15 se refleja la tendencia identificada para estas iniciativas, la estimación de escombros de Miyamoto (2016) es muy superior en el caso de estructuras de concreto reforzado y mampostería con respecto a FEMA (2020), de igual manera se observa que en estructuras metálicas, madera e informales la cantidad de escombros estimada es insignificante en comparación a los grupos anteriormente mencionados y además, no varía considerablemente entre ambas iniciativas.

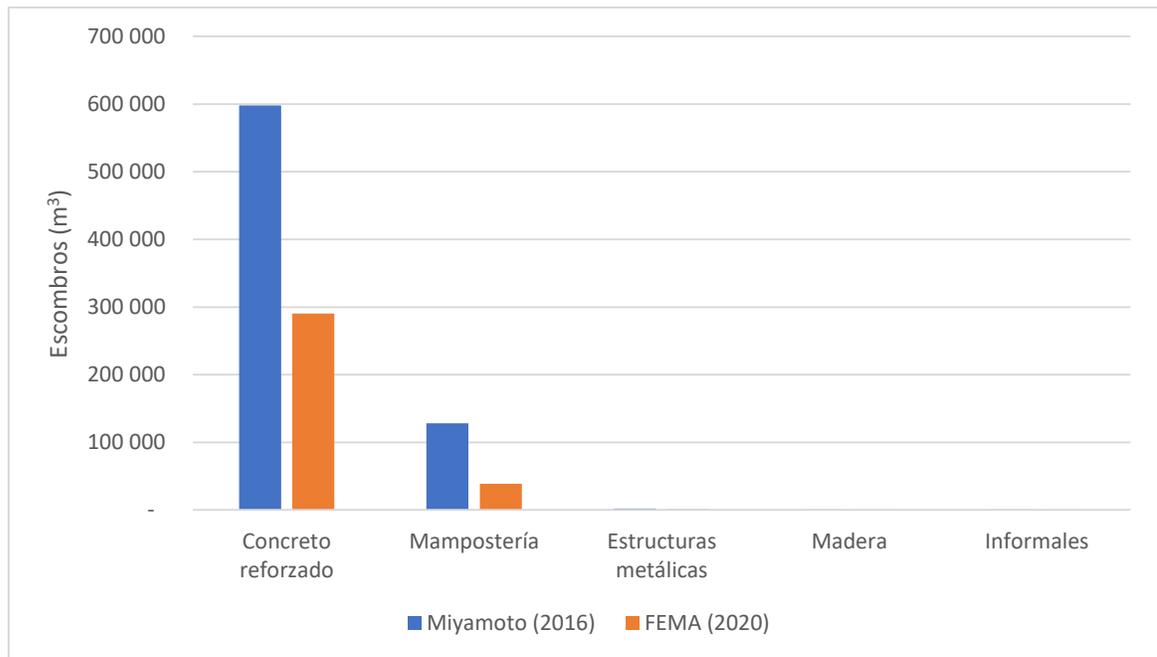


Figura 5.15. Estimación de escombros por taxonomía base agrupada según la iniciativa Miyamoto (2016) y FEMA (2020)

Dicha tendencia se observa también en niveles de clasificación de taxonomía más específicos como taxonomía base (Figura 5.16) y taxonomía (Figura 5.17).

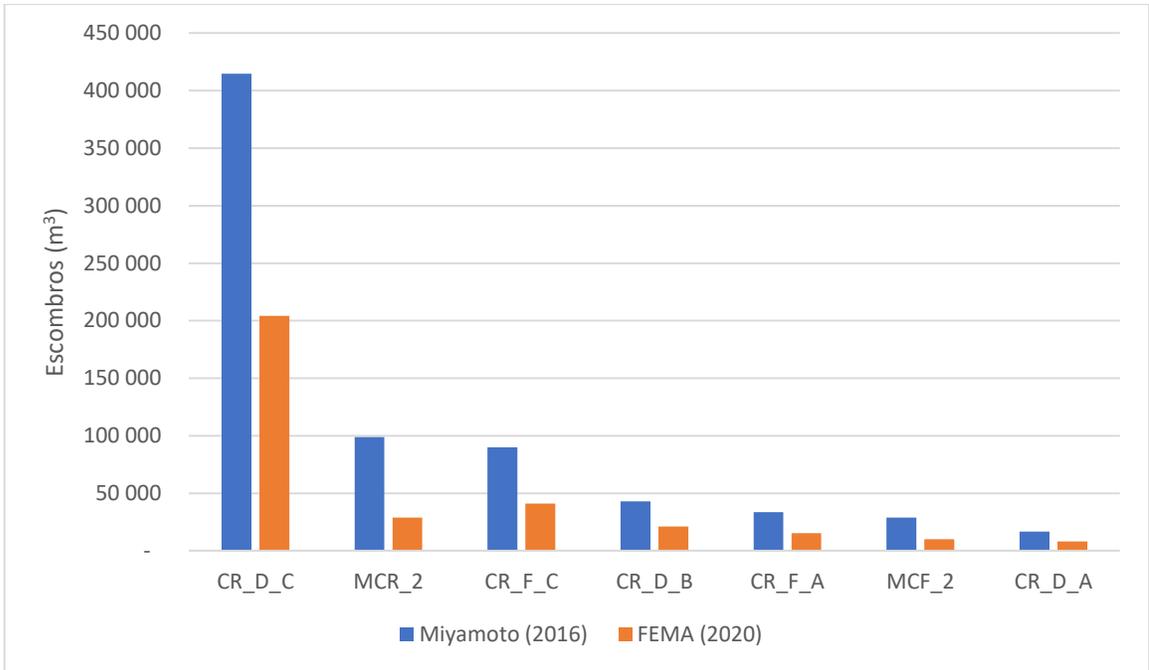


Figura 5.16. Estimación de escombros por taxonomía base para los siete casos con mayores estimaciones según la iniciativa Miyamoto (2016) y FEMA (2020)

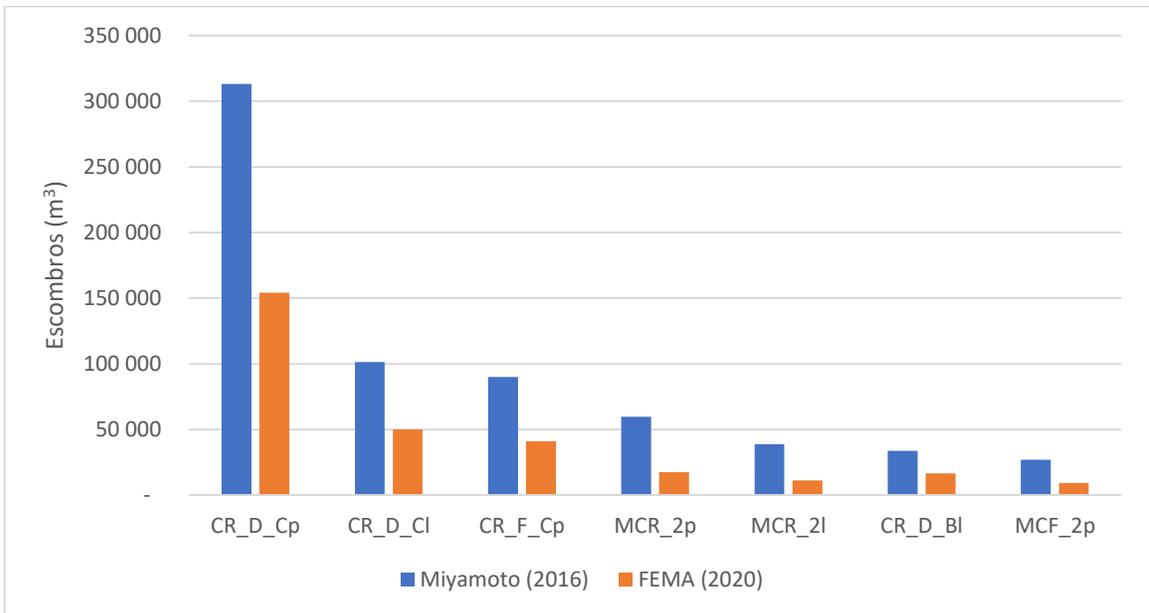


Figura 5.17. Estimación de escombros por taxonomía para los siete mayores casos según la iniciativa Miyamoto (2016) y FEMA (2020)

En la Figura 5.18 se presenta la estimación de escombros por barrio según ambas iniciativas consideradas, se puede observar que el barrio con mayor valor esperado de escombros corresponde a Américas para ambas iniciativas, se mantiene la tendencia observada en los resultados por niveles de taxonomía en los que la iniciativa Miyamoto (2016) estima aproximadamente el doble de escombros en todos los casos.

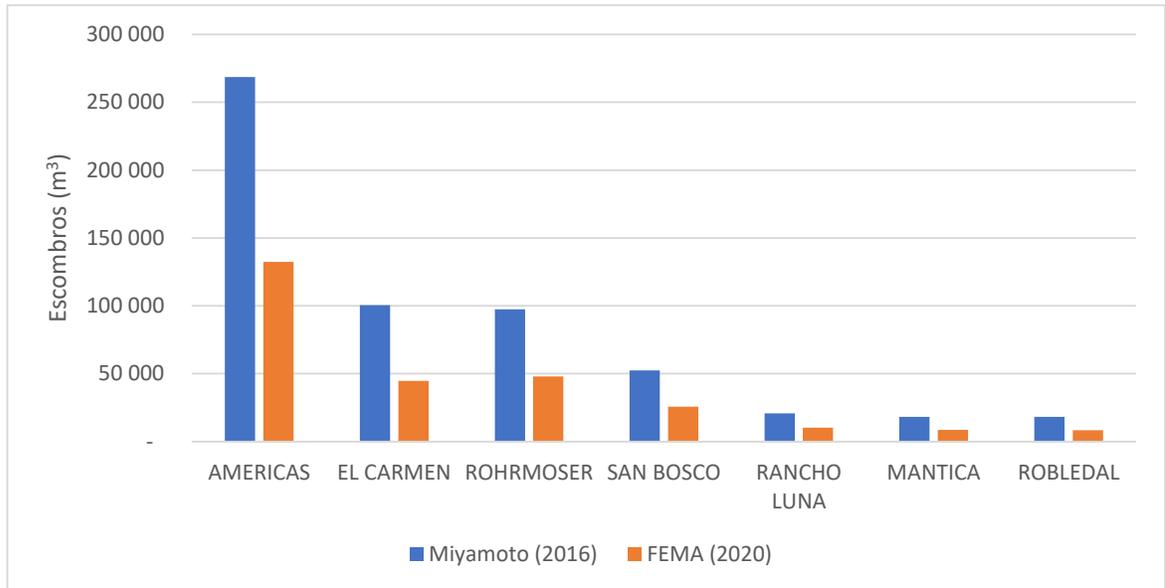


Figura 5.18. Estimación de escombros para los siete barrios con mayores escombros esperados según la iniciativa Miyamoto (2016) y FEMA (2020)

En la Figura 5.19 se presenta la estimación de escombros por distritos para las dos iniciativas consideradas, se observa el mismo comportamiento presentado en los casos anteriores. El distrito con mayor cantidad de escombros corresponde a Mata Redonda, seguido por El Carmen y Hospital. Estos resultados coinciden con los presentados anteriormente para pérdidas económicas por distrito, lo cual es de esperarse ya ambas consecuencias mencionadas se derivan directamente de las estructuras con mayores daños.

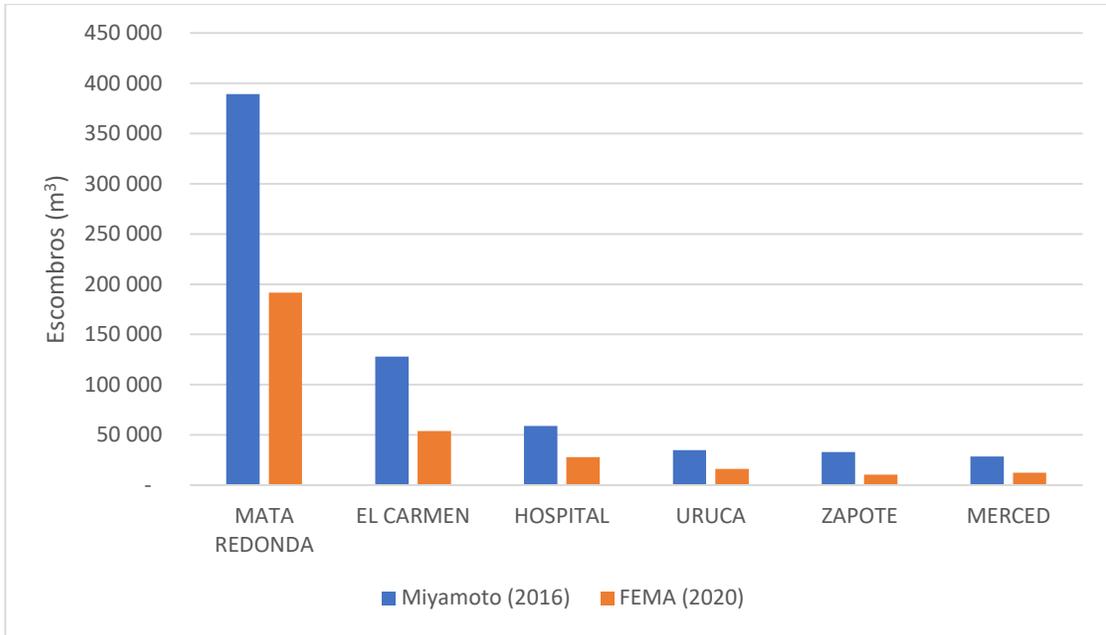


Figura 5.19. Estimación de escombros por distrito según la iniciativa Miyamoto (2016) y FEMA (2020)

A continuación se presentan la Figura 5.20 y Figura 5.21, en estas se puede observar la distribución estimada de escombros según la iniciativa FEMA (2020) y Miyamoto (2016), respectivamente. Se observa que para ambas iniciativas se produce una distribución similar en el caso de escombros, con barrios céntricos con alta estimación como lo son Américas, Rohrmoser y El Carmen, y además de estos se espera mayor cantidad de escombros en los barrios del sureste. Esta estimación por barrio es de interés ya que puede permitir la toma de decisiones anticipadas con relación a la disposición o manejo de los potenciales escombros.

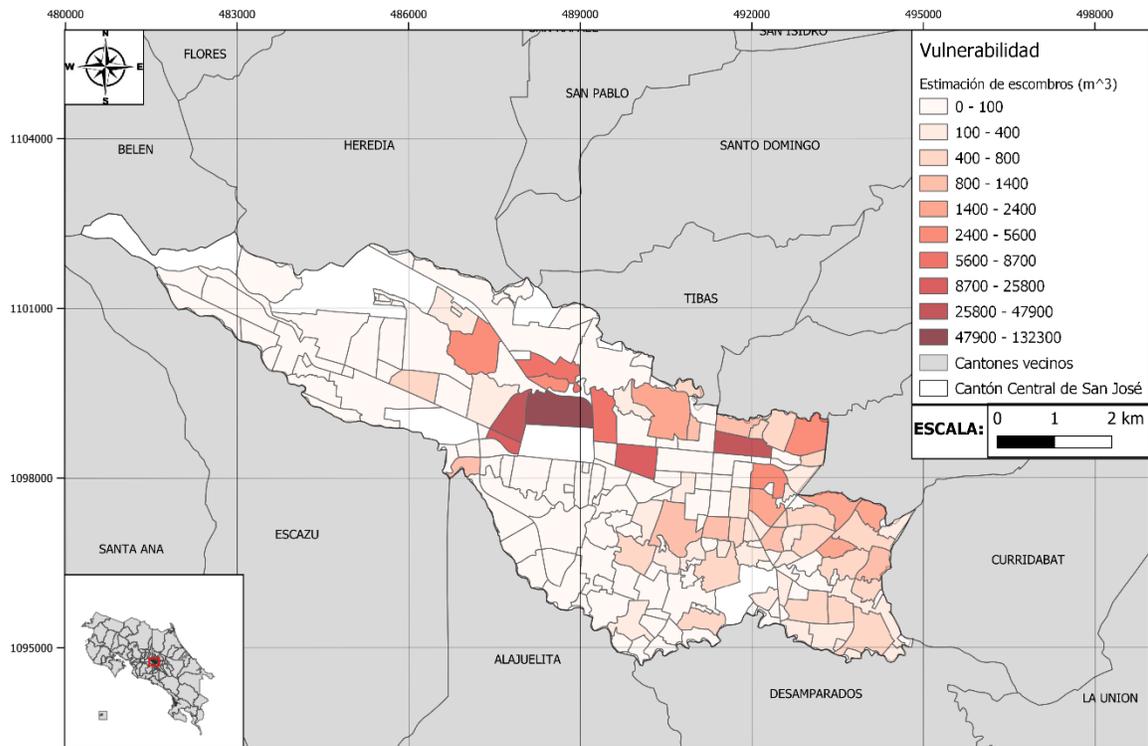


Figura 5.20. Mapa de distribución de escombros por barrio según la iniciativa FEMA (2020).

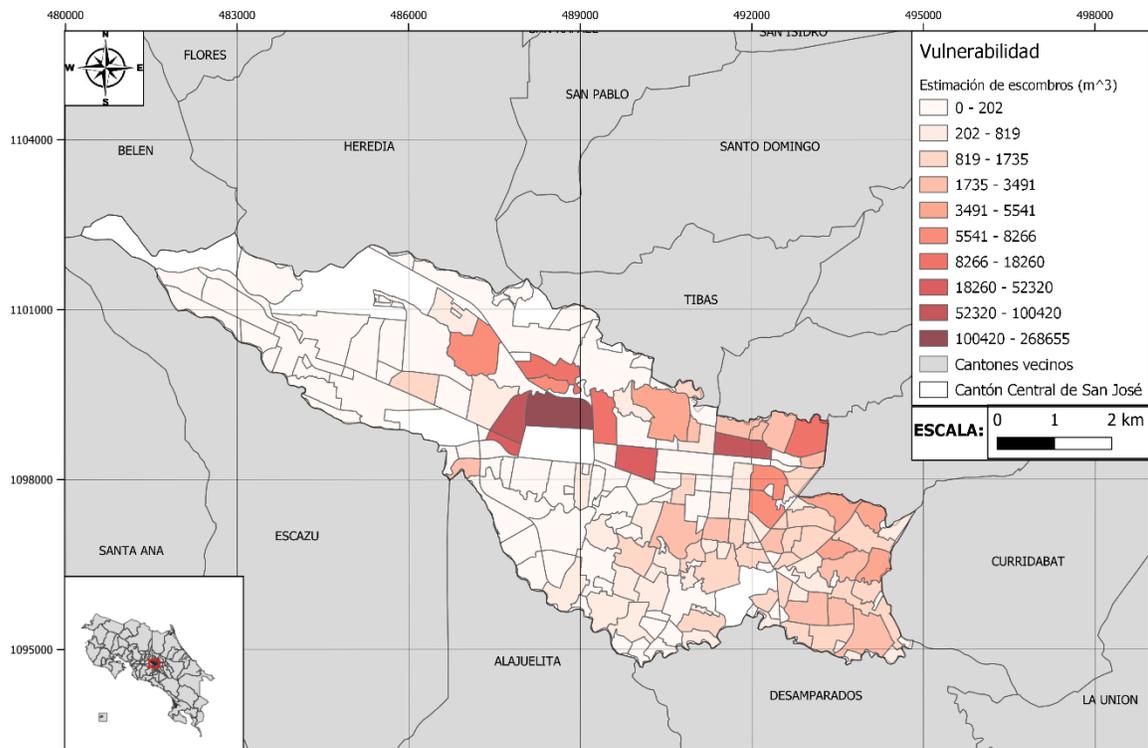


Figura 5.21. Mapa de distribución de escombros por barrio según la iniciativa Miyamoto (2016).

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

1. Se identifican y describen ocho iniciativas de evaluación de riesgo sísmico con enfoque en estimación de pérdidas económicas, cinco desarrolladas para la estimación de víctimas y dos dedicadas a la estimación de escombros.
2. Se desarrolla un documento guía (hoja de cálculo de Excel) para generar funciones de vulnerabilidad para diferentes tipologías a partir de funciones de fragilidad y de consecuencias, para la estimación de víctimas de acuerdo con la metodología GEM. Utilizando dicha metodología, se generan curvas de vulnerabilidad para las 17 tipologías consideradas en el estudio, aplicando distintas funciones de consecuencias, lo cual permite realizar la estimación de víctimas para el escenario considerado.
3. Se cuantifica el impacto de los modelos de consecuencias en la estimación de pérdidas económicas, obteniendo tres grupos con valores similares. Se presentan diferencias de hasta $\$95$ mil millones de colones para una variación de 1% en los factores de pérdidas, considerando una estimación de riesgo sísmico determinista de un evento sísmico máximo probable generado por la falla Cipreces. En general se obtiene un rango que va desde los 453 hasta los 1326 miles de millones de colones en pérdidas, se determina que dicho rango se debe a las distintas consideraciones tomadas para desarrollar cada modelo de consecuencias, en las que se incluye la vulnerabilidad de la zona para la cual se desarrolló, legislación propia del país, estadísticas de eventos pasados y la limitación de estudios en el tema hasta la fecha.
4. Se cuantifica el impacto de los modelos de consecuencias derivados de metodologías semi-empíricas: FEMA (2020) y Miyamoto (2016), en la estimación de víctimas con diferencias de 255% en la estimación final para un aumento de 20% en los factores de pérdidas aplicados, considerando una estimación de riesgo sísmico determinista de un evento sísmico máximo probable generado por la falla Cipreces. En el caso de las iniciativas derivadas de métodos empíricos, estas sobreestimaron la cantidad de víctimas debido a las consideradas que fueron desarrolladas para zonas con mayor vulnerabilidad y otras prácticas constructivas distintas.
5. Se realizan cálculos de escombros para dos iniciativas empíricas identificadas, considerando una estimación de riesgo sísmico determinista de un evento sísmico máximo probable generado por la falla Cipreces, se encontró que en el caso de FEMA

(2020) la estimación fue menor, sin embargo, en dicho caso se tuvo que hacer un cálculo no considerado por la iniciativa para obtener la estimación en unidades de volumen. En el caso de Miyamoto (2016) se observó que la estimación de escombros fue mayor, y en dicho caso no se proponen factores específicos para estados de daño que no sean daño completo.

6. En términos absolutos se encontró que los grupos de tipologías más vulnerables a pérdidas económicas y generación de escombros corresponden a las estructuras de concreto reforzado, seguido de las estructuras de mampostería para la amenaza considerada. Mientras que las más vulnerables en el caso de víctimas en términos absolutos corresponden a las estructuras de madera y mampostería para los escenarios con modelos semi-empíricos. En términos relativos (Pérdidas económicas o escombros estimados/área de construcción del grupo de taxonomía) se encontró que las más vulnerables son las estructuras de concreto reforzado, mampostería y estructuras metálicas respectivamente, en el caso de las víctimas, corresponden a las estructuras de madera y mampostería para los escenarios con modelos semi-empíricos, para la amenaza considerada.
7. El software OpenQuake demostró ser una herramienta útil para los distintos cálculos de riesgo sísmico realizados, esta se encuentra en constante desarrollo y mejora, por lo que se podría aprovechar para futuros estudios de riesgo sísmico.

6.2 Recomendaciones

1. Se recomienda la aplicación del modelo de consecuencias de Yepes y Silva (2017) en la estimación de pérdidas económicas para Costa Rica ya que este modelo fue generado para países de América del Sur, por lo que de los modelos considerados es el que tiene más similitud debido a las prácticas constructivas. Sin embargo, se podrían obtener otras estimaciones incorporando consideraciones de otros modelos de consecuencias como es el caso de Bal et al. (2008) con la incorporación del costo de demolición y acarreo de escombros en los factores aplicados, esto permitiría plantear escenarios con distintos enfoques.
2. En el caso de estimación de víctimas se recomienda la aplicación del modelo de consecuencias Miyamoto (2016), debido a que este fue modificado para su aplicación en Costa Rica, en dicho estudio se comprobó que las estimaciones obtenidas se asemejan a los datos de eventos pasados en el país.

3. Se recomienda la aplicación del modelo de consecuencias de FEMA (2020) para la estimación de escombros ya que dicha iniciativa considera todos los estados de daño en la estimación de escombros.
4. Realizar una evaluación de modelos de consecuencias utilizando un escenario probabilista, así como otros escenarios deterministas.
5. Se recomienda el uso del software OpenQuake para futuros estudios de riesgo sísmico.
6. Se recomienda generar un plan de manejo de escombros para el cantón Central de San José en caso de requerirse, ya que esto tendría un impacto positivo tanto económico como ambiental.
7. Se recomienda el desarrollo y uso de modelos de consecuencias semi-empíricos o analíticos ya que, según los resultados obtenidos, los modelos empíricos arrojaron resultados que no coinciden con los datos observados en Costa Rica.
8. Investigar otras consecuencias de los terremotos como las personas que pierden la vivienda, pérdidas del inventario comercial y tiempo de reparación.
9. Investigar la incertidumbre asociada a las distintas etapas de un estudio de riesgo sísmico, lo cual permitiría plantear escenarios conservadores o no conservadores.
10. Generar modelos de consecuencias enfocados en las edificaciones de Costa Rica con la ayuda de profesionales en valuación de bienes y estadística. Sería valioso generar modelos de consecuencias específicos para cada tipología constructiva en el caso de las pérdidas económicas.

7 Bibliografía.

- Bal I.E., Crowley H., Pinho R. y Gulay F.G. (2008). Detailed assessment of structural characteristics of Turkish RC building stock for loss assessment models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 914-932.
- Calderón, A. (2016). Probabilistic Earthquake Loss Assessment for Costa Rica. Tesis de Maestría. Earthquake and Seismology Engineering. Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia.
- Calderon, A., Silva, V. (2019). Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of the residential building stock in Costa Rica. *Bull Earthquake Eng*, 17, 1257–1284. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0499-1>
- Calderón, E. (2018). Curvas de fragilidad según el método del espectro de capacidad para tipologías estructurales definidas en el código sísmico de Costa Rica. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Climent, Á., Rojas, W., Alvarado, G. E., y Benito, B. (2008). *Proyecto Resis II. Recuperado de* https://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes_sismos/amenaza_sismica_cr.pdf
- D'Áyala, D., K. S. Jaiswal, D. J. Wald, K. Porter, and M. Greene, (2010). Collaborative effort to estimate collapse fragility for buildings worldwide: the WHE-PAGER project, Ninth U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering.
- D'ayala, D., Meslem, A., Vamvastikos, D., Porter, K., Rossetto, T., Crowley, H., y Silva, V. (2014). Guidelines for analytical vulnerability assessment of low/mid-rise Buildings—Methodology. *Vulnerability Global Component project*. Recuperado de: <https://www.globalquakemodel.org/products?type=Dataset>
- Durukal, E., Erdik, M., y Sesetyan, K. (2006). Expected earthquake losses to buildings in Istanbul and implications for the performance of the Turkish Catastrophe Insurance Pool. *Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute*. Recuperado de: <https://dc.engconfintl.org/geohazards/34/>

- Evaluación de Riesgos Naturales, (2009). Riesgo sísmico de San José: análisis probabilista de amenazas y riesgos naturales. Recuperado de: https://ecapra.org/sites/default/files/documents/ERN-CAPRA-R5-T2.7%20-%20Terremoto%20San%20Jos%C3%A9_COR.pdf
- Esquivel-Salas, L. C., Schmidt-Díaz, V., Pittore, M., Hidalgo-Leiva, D. A., Haas, M., & Moya-Fernández, A. (2021). Dataset of the attributes affecting seismic performance of a sample of buildings from San José-Costa Rica. Mendeley Data. <https://doi.org/10.17632/8BY7R5SZCN.2>
- Esquivel-Salas, L. C., Pittore, M., Schmidt-Díaz, V., Haas, M. (2021): Photographs of buildings from San Jose canton, Costa Rica, taken from the street. 4TU.ResearchData. Collection. <https://doi.org/10.4121/c.5618230.v1>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2001). Hazus-MH 2.1, Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model. Recuperado de https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-09/fema_hazus_earthquake-model_technical-manual_2.1.pdf
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2020). HAZUS–MH 2.1: Technical Manual. Recuperado de https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-10/fema_HAZUS_earthquake_technical_manual_4-2.pdf
- GEM (2020). The OpenQuake-engine User Manual. Global Earthquake Model (GEM) Open-Quake Manual for Engine version 3.9.0. Doi: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.9.0, 0-183.
- GEM (2021). Vulnerability Modellers ToolKit (VMTK). Recuperado de: <https://github.com/GEMScienceTools/VMTK-Vulnerability-Modellers-ToolKit>
- Gutenberg, B. (1945). Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 35(1), 3-12.
- Gutenberg, B., Richter, C. F. (1936), Discussion: Magnitude and energy of earthquakes (PDF), Science, 83 (2147),183-185. Doi:10.1126/science.83.2147.183.

- Hanks, T. C., Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, 84 (B5), 2348-2350. Disponible en: doi:10.1029/JB084iB05p02348
- Haselbach, L. M., y Bruner, S. U. (2006). Determining construction debris recycling dumpster densities. *Journal of Green Building*, 1(3), 139-147.
- Hidalgo-Leiva, D., Smidth-Díaz, V., y Cruz Azofeifa, M. (2016). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de hospitales de Costa Rica con la aplicación de índices de vulnerabilidad.
- Hidalgo-Leiva, D., Schmidt-Díaz, V., Esquivel-Salas, L., Linkimer, L., Arroyo, I., Arroyo, M., Castillo, R., Rodríguez, M. J., Lobo, S., Escalante, J., Carranza, M., y Cerdas, L. (2021). Actualización de la Amenaza Sísmica para Costa Rica: Proyecto UCREA. *Espacio de Estudios Avanzados de la Universidad de Costa Rica (UCREA)*.
- Jaiswal, K. S., y Wald, D. J. (2010). Development of a semi-empirical loss model within the USGS Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response (PAGER) System. *Proc. of the 9th US and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering: Reaching Beyond Borders*, Toronto, Canada.
- Kappos, A., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos, C. y Penelis, G. (2006). A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 391-413.
- Khanal, R., Subedi, P. U., Yadawa, R. K., y Pandey, B. (2021). Post-earthquake reconstruction: Managing debris and construction waste in Gorkha and Sindhupalchok Districts, Nepal. *Progress in Disaster Science*, 9, 100151.
- Laboratorio de Ingeniería Sísmica. (2011). Magnitud e intensidad. Recuperado de <http://lis.ucr.ac.cr/index.php?id=11>
- Lantada, N. (2007). Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona. *Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Milutinovic, Z. V., y Trendafiloski, G. S. (2003). Risk-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns. Contract: EVK4-CT-2000-00014, WP4: Vulnerability of Current Buildings, 1-111.

- Miyamoto (2016). The USAID/OFDA PREPARE Program FINAL REPORT Phase I: Assessment of Earthquake Risks. San Jose, Costa Rica.
- Mouroux, P., Brun, B.L. (2006). Presentation of RISK-UE Project. *Bull Earthquake Eng* 4, 323–339. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9020-3>
- Pagani, M., Silva, V., Rao, A., Simionato, M., Gee, R., Johnson K. (2021). OpenQuake Engine User Instruction Manual: v3.12.0. *GEM Foundation*, Pavia, Italy. Recuperado de <https://docs.openquake.org/manuals/OpenQuake%20Manual%20%28latest%29.pdf>
- Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., ... y Simionato, M. (2014). OpenQuake engine: An open hazard (and risk) software for the global earthquake model. *Seismological Research Letters*, 85(3), 692-702.
- Pitilakis, K., Crowley, H., y Kaynia, A. M. (2014). SYNER-G: typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 27, 1-28.
- Porter, K., Farokhnia, K., Vamvatsikos, D., y Cho, I. H. (2015). Guidelines for component-based analytical vulnerability assessment of buildings and nonstructural elements. *Global Vulnerability Consortium*, Recuperado de: <http://www.sparisk.com>.
- Porter, K. (2020). A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk. *University of Colorado Boulder*, 136. Recuperado de: <https://www.sparisk.com/pubs/Porter-beginners-guide.pdf>.
- Pujades, L. G., y Barbat, A. H. (2004). Metodología de estimación de la vulnerabilidad sísmica de las construcciones clasificadas de 'importancia especial' en la NCSE--02. *Informe Técnico N° IT 438*, Noviembre 2004.
- Python Software Foundation (2020). Python Language Reference, version 3.8. Disponible en <http://www.python.org>
- RSN. (2019). ¿Por qué tiembla tanto en Costa Rica?. Recuperado de <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/sismologia/4135-por-que-tiembla-tanto-en-costa-rica>

- RSN. (2020). Sismos históricos. Recuperado de <https://rsn.ucr.ac.cr/actividad-sismica/sismos-historicos>
- So E. y Pomonis, A. (2012). Derivation of globally applicable casualty rates for use in earthquake loss estimation models. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, Paper no. 1164.
- Spence, R. ed. (2007). Human Losses, Chapter 5 in Earthquake disaster scenario prediction and loss modeling for urban areas, *LessLoss Report No 2007/07*, 51-58.
- UNISDR. (2009). 2009 UNISDR Terminology on disaster risk reduction. In International Strategy for Disaster Reduction (ISDR). United Nations International Strategy for Disaster Reduction. <https://doi.org/978-600-6937-11-3>
- Wald, D. J., Earle, P. S., Allen, T. I., Jaiswal, K., Porter, K., y Hearne, M. (2008). Development of the US Geological Survey's PAGER system (prompt assessment of global earthquakes for response). In *Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering*, 12-17.
- Yepes-Estrada C, Silva V, Valcárcel J, Acevedo A, Tarque N, Hube M, Coronel G, Santa-María H (2017) Modeling the residential building inventory in South America for seismic risk assessment. *Earthquake Spectra* 33(1), 299–322.
- Wood, H. O., y Neumann, F. (1931). Modified Mercalli Intensity Scale of 1931: Seismological Society of America Bulletin, v. 21, no. 4, 277-283.

8 Apéndices

Apéndice A. Equivalencia de tipologías propuesta para la estimación de víctimas.

ID	Nombre de la clase	GEM Taxonomy	Tipo de material	No. Pisos	FEMA (2020)	Miyamoto (2016)	JAISWAL Y WALD (2010)	SO Y POMONIS (2012)
1	MCR.1	MCR+CBH/LWAL/HEX:1/IRRE/FN	MCR	1	RM2L	05	Mampostería de ladrillo con mortero de cal / cemento	Mampostería estructural (baja altura)
2	MCR.2	MCR+CBH/LWAL/H_BET:2:+/IRRE/FC	MCR	2 o +	RM2L	05	Mampostería de ladrillo con mortero de cal / cemento	Mampostería estructural (baja altura)
3	MCF.1	MCF+CLBRS/LWAL/HEX:1/IRRE/FN	MCF	1	RM2L	05	Mampostería de ladrillo con mortero de cal / cemento	Mampostería confinada
4	MCF.2	MCF+CLBRS/LWAL/H_BET:2:+/IRRE/FC	MCF	2 o +	RM2L	05	Mampostería de ladrillo con mortero de cal / cemento	Mampostería confinada
5	CR.D.A	CR/LDUAL/H_BET:1:5/IRRE/FC	CR	1 a 5	PC2L	07	Marcos de momento de concreto no dúctiles	-
6	CR.D.B	CR/LDUAL/H_BET:6:10/IRRE/FC	CR	6 a 10	PC2M	08	Marcos de momento de concreto no dúctiles	-
7	CR.D.C	CR/LDUAL/H_BET:11:+/IRRE/FC	CR	11 o +	PC2H	08	Marcos de momento de concreto no dúctiles	-
8	CR.I.A	CR/LFINF/H_BET:1:5/IRRE/FC	CR	1 a 5	C3L	07	Marcos de momento de concreto no dúctiles	-

9	CR.F.A	CR/LFM/H_BET:1:5/IRRE/FC	CR	1 a 5	C1L	07	Marcos de momento de concreto no dúctiles	-
10	CR.F.C	CR/LFM/H_BET:6:10/IRRE/FC	CR	11 o +	C1H	08	Marcos de momento de concreto no dúctiles	-
11	CR.W.A	CR/LWAL/H_BET:1:5/IRRE/FC	CR	1 a 5	C2L	09	Marcos de momento de concreto no dúctiles	-
12	CR.W.C	CR/LWAL/H_BET:6:10/IRRE/FC	CR	11 o +	C2H	10	Marcos de momento de concreto no dúctiles	-
13	S.F.C.A	S+SL/LFM/H_BET:1:5/IRRE/FME	S	1 a 5	S1L	11	Marco de momento de acero con muro de relleno de concreto	-
14	S.F.H.A	S/LFM/H_BET:1:5/IRRE/FC	S	1 a 5	S1L	11	Marco de momento de acero con muro de relleno de concreto	-
15	W.F.A	W/LFM/H_BET:1:5/IRRE/FW	W	1 a 2	W1	01	Estructura de madera ligera diseñada para cargas sísmicas	-
16	W.W.A	W/LWAL/H_BET:1:5/IRRE/FW	W	1 a 2	W1	01	Estructura de madera ligera diseñada para cargas sísmicas	-
17	INFOR				URML	15	Edificaciones con paredes de barro	-

Apéndice B. Mapas de pérdidas económicas

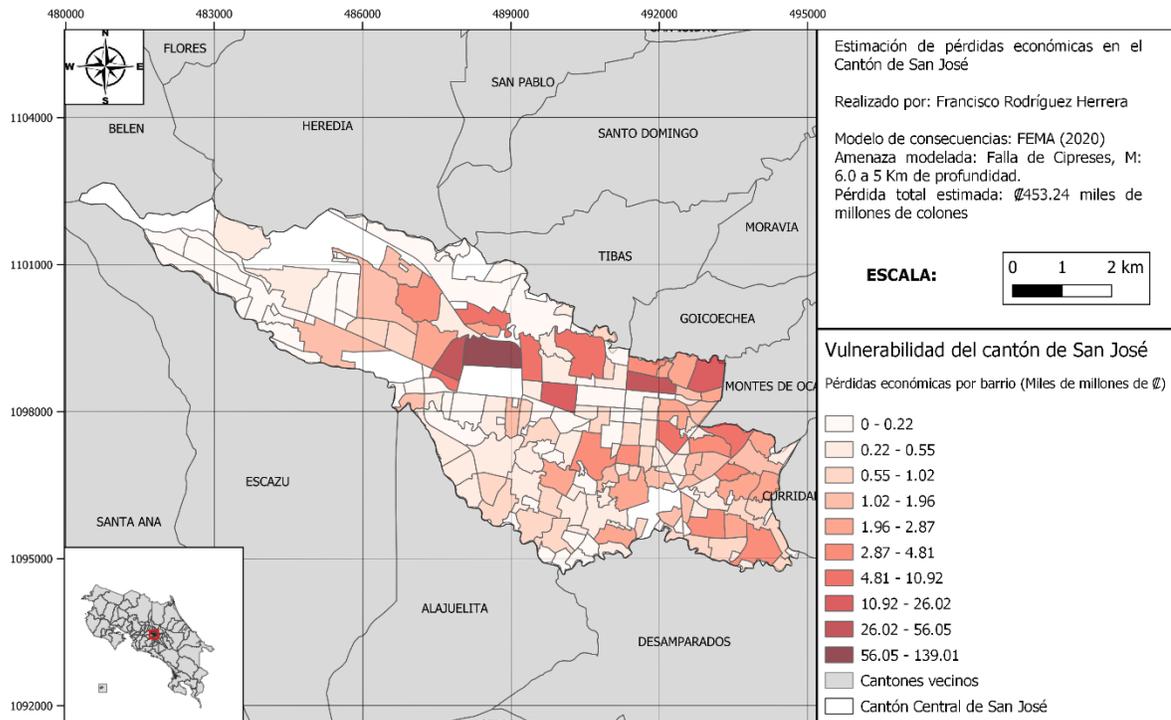


Figura B.1. Mapa de pérdidas por barrios del cantón Central de San José para el modelo propuesto por FEMA (2020).

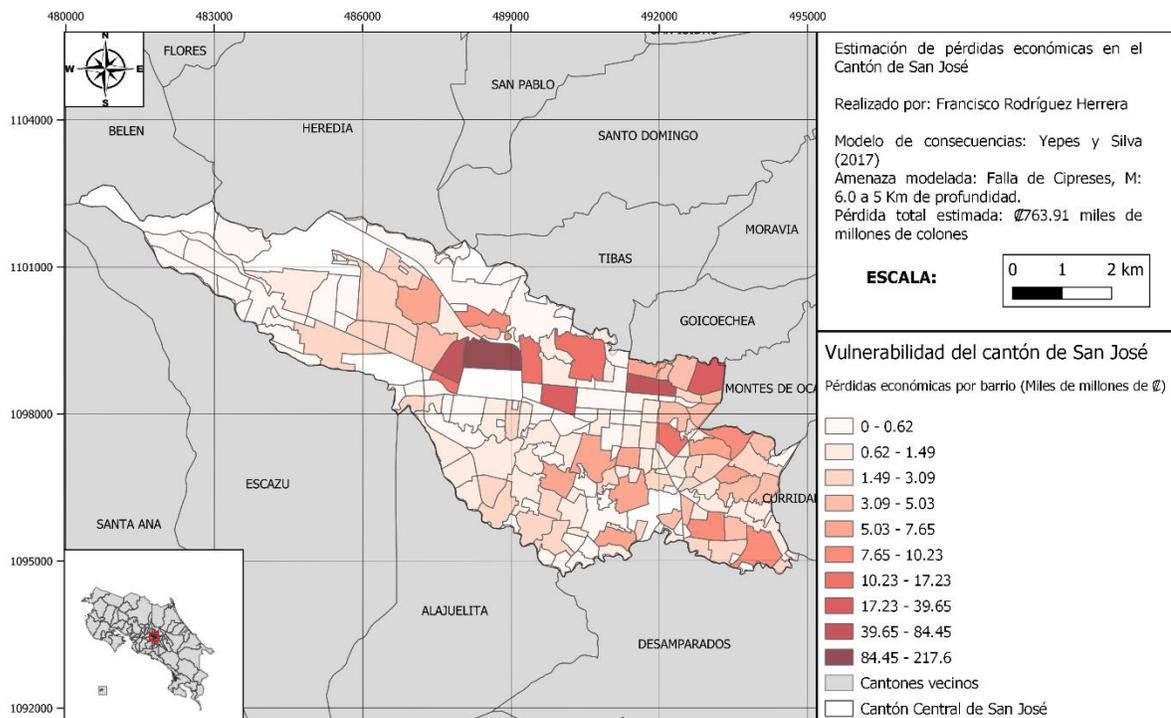


Figura B.2. Mapa de pérdidas económicas por barrios del cantón Central de San José para el modelo propuesto por Yepes y Silva (2017).

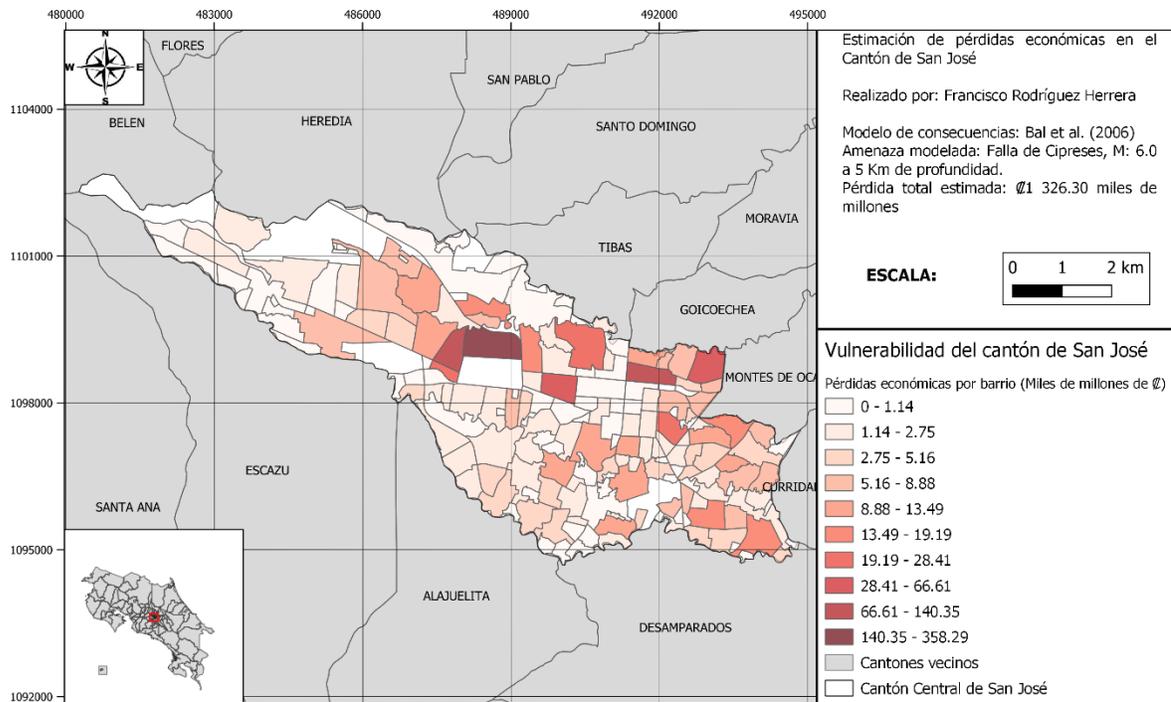


Figura B.3. Mapa de pérdidas económicas por barrios del cantón Central de San José para el modelo propuesto por Bal et al. (2006).

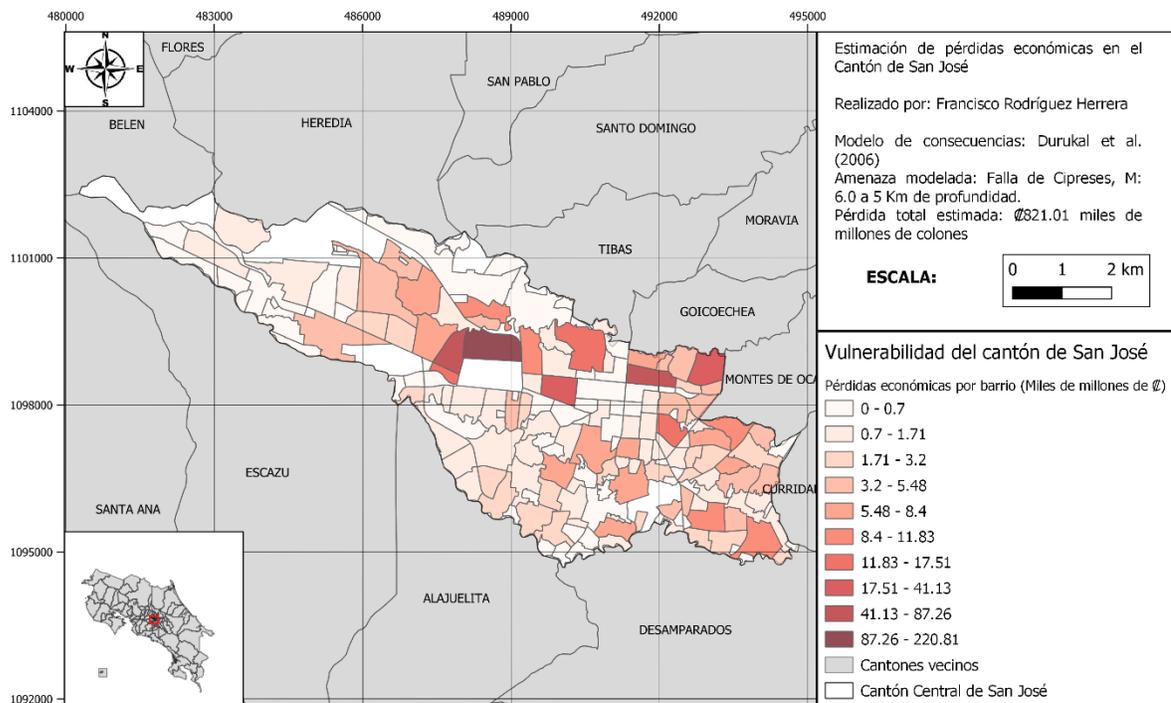


Figura B.4. Mapa de pérdidas económicas por barrios del cantón Central de San José para el modelo propuesto por Durukal et al. (2006).

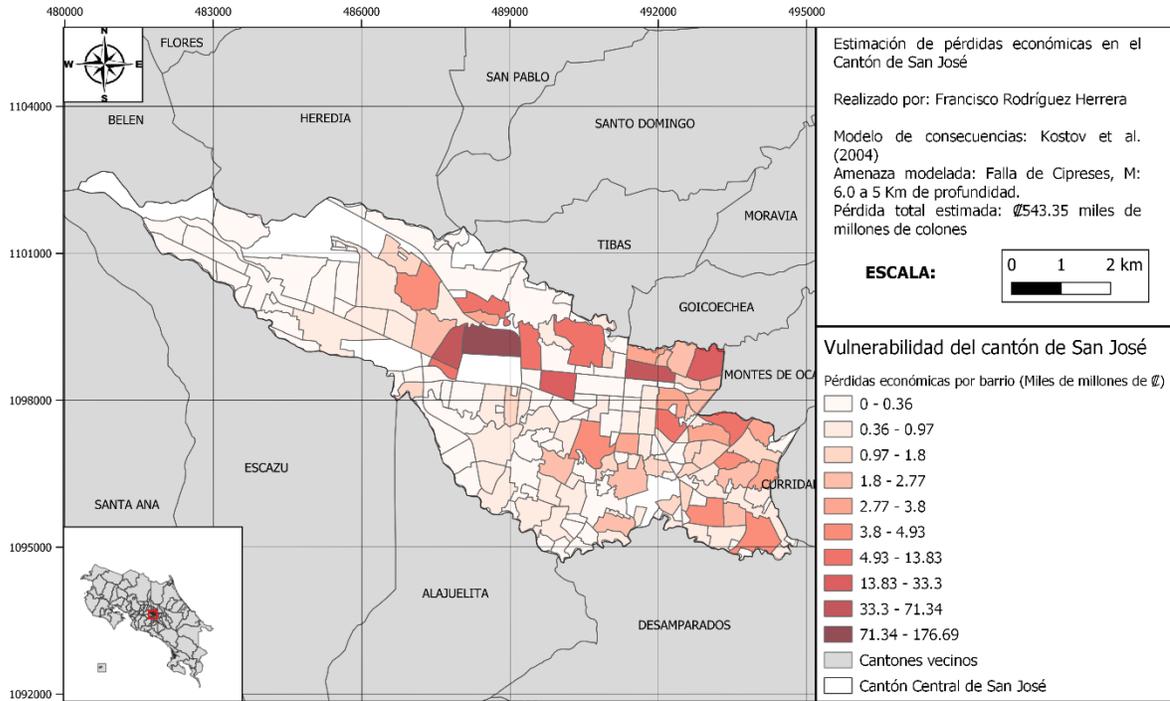


Figura B.5. Mapa de pérdidas económicas por barrios del cantón Central de San José para el modelo propuesto por Kostov et al. (2004).

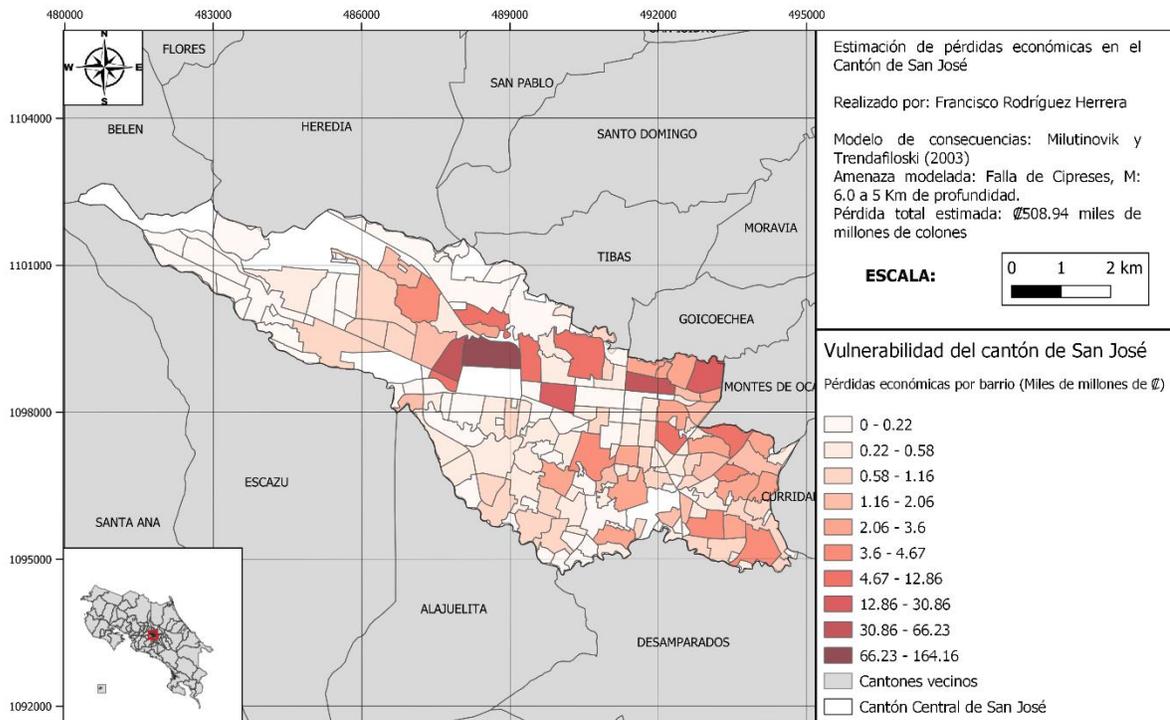


Figura B.6. Mapa de pérdidas económicas por barrios del cantón Central de San José para el modelo propuesto por Milutinovic y Trendafiloski (2003).

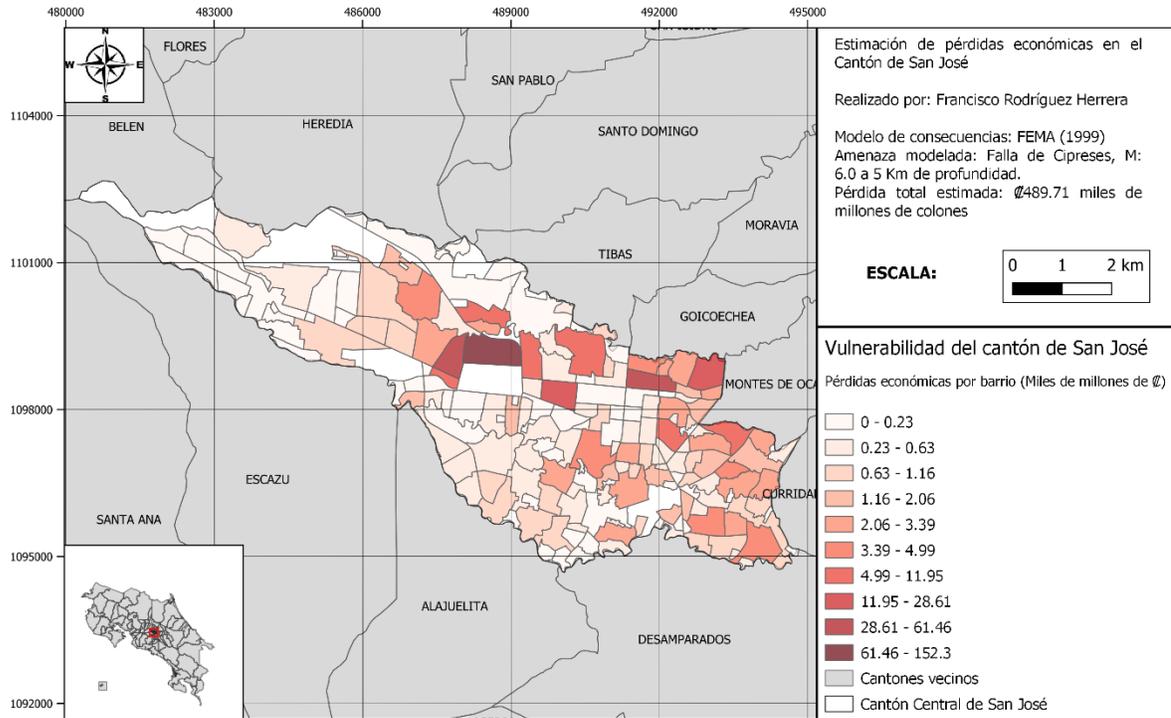


Figura B.7. Mapa de pérdidas económicas por barrios del cantón Central de San José para el modelo propuesto por FEMA (1999).