

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Estudio preliminar de riesgo sísmico del Centro Histórico de la ciudad de Quito basado en la metodología del Global Earthquake Model para el escenario sísmico del 5 de marzo de 1987

Indyra Dayanne Delgado Corrales

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 8 de diciembre de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

Estudio preliminar de riesgo sísmico del Centro Histórico de la ciudad de Quito basado en la metodología del Global Earthquake Model para el escenario sísmico del 5 de marzo de 1987

Indyra Dayanne Delgado Corrales

Nombre del profesor, Título académico

Juan Carlos Pantoja, M.Sc.

Quito, 8 de diciembre de 2020

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Indyra Dayanne Delgado Corrales

Código: 00130787

Cédula de identidad: 0503286015

Lugar y fecha: Quito, 8 diciembre de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico con todo mi amor a mis padres, Mercy e Isaac, que han sabido forjarme con buenos sentimientos, hábitos y valores. Me han apoyado incondicionalmente en cada meta y en cada sueño que me he planteado. Por darme todo y por ser mi fuerza para seguir adelante, incluso en los momentos difíciles.

De igual manera, dedico este trabajo a mis abuelos, Mariana y Gonzalo, que me han educado desde que nací y a quienes amo de manera única. Sobre todo, a mi abuelo que siempre estuvo feliz de saber que cumplo mis objetivos, y aunque no esté presente en cuerpo, siempre está acompañándome.

Y a mis hermanas, Emily e Isabella, que siempre están junto a mí alegrándome cada día.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradezco a mis padres, quienes se han esforzado por ayudarme cumplir mis metas y por estar siempre para mí.

Agradezco mucho la ayuda de mis maestros, y a la universidad en general por los conocimientos que me han otorgado.

De la misma forma, a M.Sc. Juan Carlos Pantoja, quien fue el tutor de mi trabajo de titulación y me supo compartir sus conocimientos durante la realización de este documento.

Y a Alejandro Calderón de la asociación Global Earthquake Model, quien me brindó sus conocimientos y me guio en este trabajo.

RESUMEN

El Centro Histórico de Quito (de aquí en adelante CHQ) se encuentra sobre la falla de Quito, la cual es de tipo inversa cortical y presenta actividad micro sísmica constante. El 5 de marzo de 1987, un sismo de magnitud 6.9 se dio a 75 km de la ciudad de Quito, el cual afectó al CHQ de manera significativa, ocasionando daños en las estructuras. La realidad sísmica de esta zona genera la necesidad de realizar un estudio de riesgo sísmico que permita tomar acciones de preparación, prevención y mitigación de riesgo. El presente documento aborda los tres parámetros de riesgo: exposición, amenaza y vulnerabilidad.

Se desarrolló un modelo de exposición a partir de información recolectada del Geoportal de Quito y del Sistema Metropolitano de Catastro, el cual recopiló 1183 estructuras residenciales y comerciales con información de: avalúo, material, año de construcción, sistema de resistencia lateral, número de pisos, área e información de ductilidad.

El parámetro de amenaza se basa en un estudio probabilista de eventos puntuales para el sismo de 1987, del cual se recopiló información sobre el plano de ruptura. Asimismo, mediante tres ecuaciones de atenuación: AkkarBommer2010, BooreAtkinson2008, ZhaoEtAl2006, se realizó el movimiento del terreno. La ecuación AkkarBommer2010 arrojó una intensidad de aceleración máxima absoluta de 0.06g en la zona de estudio, coincidiendo con los registros reales del catálogo sísmico. Además, la vulnerabilidad sísmica se analiza mediante curvas de fragilidad desarrollados por Martins y Silva (2020), las cuales permiten determinar las pérdidas económicas según doce tipos de estructuras definidas.

Al unir los tres componentes y usando el software de código abierto OpenQuake, de la asociación Global Earthquake Model (GEM), se realiza el cálculo del riesgo sísmico, donde se obtuvo una pérdida de 2'272,082.5 USD para el evento de análisis de 1987. Encontrando que el 61.46 % de las pérdidas se dieron en aquellas estructuras cuyo sistema resistente a cargas laterales no son dúctiles de uno a cuatro pisos, construidas principalmente con muros de adobe. De la misma forma, el 21.79% de las pérdidas se dan debido a muros de ladrillo no dúctiles de uno a tres pisos. El porcentaje restante lo conforman estructuras cuyo sistema resistente a carga lateral son pórticos que poseen ductilidad y están hechos de concreto armado.

Palabras clave: riesgo, exposición, amenaza, vulnerabilidad, falla.

ABSTRACT

The Historical Center of Quito (hereinafter CHQ) is located on the Quito fault, which is of inverse cortical type and presents constant micro seismic activity. On March 5, 1987, an earthquake of magnitude 6.9 occurred 75 km from the city of Quito, which affected the CHQ significantly, causing damage to the structures. The seismic reality of this zone generates the necessity to make a study of seismic risk that allows to take actions of preparation, prevention and mitigation of risk. This document addresses the three risk parameters: exposure, hazard and vulnerability.

An exposure model was developed from information collected from the Quito Geoportal and the Metropolitan Cadastre System, which compiled 1183 residential and commercial structures with information on: assessment, material, year of construction, lateral resistance system, number of floors, area and ductility information.

The parameter of hazard is based on a probabilistic study of specific events for the 1987 earthquake, from which information on the plane of rupture was collected. Also, by means of three attenuation equations: AkkarBommer2010, BooreAtkinson2008, ZhaoEtAl2006, the ground movement was made. The equation AkkarBommer2010 showed a maximum absolute acceleration intensity of 0.06g in the study area, coinciding with the actual records of the seismic catalog. In addition, seismic vulnerability is analyzed by means of fragility curves developed by Martins and Silva (2020), which allow determining economic losses according to twelve types of defined structures.

By joining the three components and using the open-source software OpenQuake, from the Global Earthquake Model (GEM) association, the calculation of seismic risk is performed, where a loss of 2'272,082.5 USD was obtained for the analysis event of 1987. Finding that 61.46 % of the losses occurred in those structures whose system resistant to lateral loads are not ductile from one to four floors, built mainly with adobe walls. Similarly, 21.79% of the losses are due to non-ductile one to three story brick walls. The remaining percentage is made up of structures whose lateral load-bearing system is made of reinforced concrete and ductile gantries.

Key words: risk, exposure, hazard, vulnerability, fault.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 15 |
| 1.1 Objetivos..... | 16 |
| 1.1.1 Objetivo general..... | 16 |
| 1.1.2 Objetivos específicos..... | 17 |
| 1.2 Justificación..... | 17 |
| 2. EXPOSICIÓN..... | 18 |
| 2.1 Generalidades del centro histórico de Quito..... | 18 |
| 2.1.1 Administración..... | 18 |
| 2.1.2 Caracterización de edificaciones..... | 19 |
| 2.2 Modelo de exposición..... | 19 |
| 2.2.1 Delimitación del caso de estudio..... | 19 |
| 2.2.2 Tipos de ocupación de estructuras..... | 20 |
| 2.2.3 Material de paredes y techo de las edificaciones..... | 21 |
| 2.2.4 Número de pisos y área de construcción..... | 24 |
| 2.2.5 Sistemas estructurales resistente a cargas laterales..... | 25 |
| 3. AMENAZA SÍSMICA..... | 28 |
| 3.1 Historia sísmica de Ecuador..... | 28 |
| 3.2 Sismicidad de la ciudad de Quito..... | 28 |
| 3.2.1 Falla de Quito..... | 29 |
| 3.2.2 Sismos históricos de Quito..... | 29 |
| 3.2.3 Sismo del 5 de marzo de 1987..... | 30 |
| 3.3 Metodología para el cálculo de amenaza sísmica..... | 30 |
| 3.4 Modelación del movimiento del terreno..... | 30 |
| 3.4.1 Mecanismos de falla..... | 31 |
| 3.4.2 Parámetros de ruptura..... | 31 |
| 3.4.3 Ecuaciones de movimiento del terreno (GMPE)..... | 33 |
| 3.5 Modelación de los mapas de movimiento del suelo..... | 33 |
| 3.5.1 Ruptura del terremoto..... | 33 |
| 3.5.2 Sitios de peligro..... | 34 |
| 3.5.3 Condiciones del sitio..... | 34 |
| 3.5.4 Parámetros de cálculo..... | 35 |
| 3.6 Análisis sísmico mediante mapas de movimiento del suelo..... | 35 |
| 3.6.1 Aceleraciones PGA del CHQ..... | 36 |
| 3.7 Análisis sísmico mediante PSHA..... | 39 |
| 3.7.1 Proyecto SARA..... | 39 |
| 3.7.2 Datos de entrada y salida para PSHA..... | 39 |
| 4. VULNERABILIDAD..... | 41 |
| 4.1 Vulnerabilidad sísmica..... | 41 |
| 4.2 Vulnerabilidad sísmica estructural en Quito..... | 41 |
| 4.3 Análisis estático no lineal pushover (APA)..... | 42 |
| 4.4 Análisis dinámico incremental (IDA)..... | 43 |
| 4.5 Modelos de vulnerabilidad..... | 43 |
| 4.5.1 Identificación de tipologías estructurales en el CHQ..... | 44 |

| | |
|--|-----------|
| 4.5.2 Evaluación de vulnerabilidad según Martins y Silva..... | 44 |
| 5. RIESGO..... | 47 |
| 5.1 Riesgo sísmico..... | 47 |
| 5.2 Riesgo sísmico de Quito..... | 47 |
| 5.3 Modelación de riesgo sísmico..... | 48 |
| 5.3.1 Escenarios de terremotos..... | 48 |
| 5.3.2 Condiciones del sitio..... | 48 |
| 5.3.3 Parámetros de cálculo..... | 49 |
| 5.4 Mapa de pérdidas por edificio..... | 49 |
| 5.4.1 Edificio con mayor pérdida..... | 50 |
| 5.5 Tipologías constructivas con mayores pérdidas..... | 51 |
| 5.5.1 Mapa de pérdidas según tipología constructiva..... | 51 |
| 5.5.2 Comparación evento 1987..... | 52 |
| 6. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES..... | 54 |
| 6.1 Conclusiones..... | 54 |
| 6.2 Recomendaciones..... | 55 |
| 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 56 |
| 8. ANEXOS..... | 58 |
| 9.1. ANEXO A: AMENAZA..... | 58 |
| 9.1.1 Archivo NRML de Earthquake Rupture..... | 58 |
| 9.1.2 Archivo NRML de GMPE..... | 58 |
| 9.1.3 Archivo job.ini para el CHQ con variabilidad..... | 59 |
| 9.1.4 Archivo job.ini para el CHQ sin variabilidad..... | 59 |
| 9.1.3 Archivo job.ini para Quito y el epicentro..... | 60 |
| 9.1.4 Distribución de PGA [g] con variabilidad para GMPE's..... | 60 |
| 9.1.5 Distribución de PGA sin variabilidad para GMPEs..... | 61 |
| 9.1.5 Distribución de PGA para Quito y epicentro 1987..... | 62 |
| 9.1.6 Archivo job_hazard.ini para PSHA..... | 63 |
| 9.2. ANEXO B: VULNERABILIDAD..... | 64 |
| 9.2.1 Curva de vulnerabilidad CR_LFINF-DUL_H3..... | 64 |
| 9.2.2 Curva de vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H2..... | 64 |
| 9.2.3 Curva de vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H5..... | 65 |
| 9.2.4 Curva de vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H6..... | 65 |
| 9.2.5 Curva de vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H3..... | 66 |
| 9.2.6 Curva de vulnerabilidad CR_LWAL-DUL_H1..... | 66 |
| 9.2.7 Curva de vulnerabilidad CR_LFM-DUM_H4..... | 67 |
| 9.2.8 Curva de vulnerabilidad CR_LFM-DUM_H3..... | 67 |
| 9.2.9 Curva de vulnerabilidad MUR-ADO_Samerica_LWAL-DNO_H2..... | 68 |
| 9.2.10 Curva de vulnerabilidad MUR-ADO_Samerica_LWAL-DNO_H3..... | 68 |
| 9.2.11 Curva de vulnerabilidad MUR_Samerica_LWAL-DNO_H3..... | 69 |
| 9.3. ANEXO C: RIESGO..... | 70 |
| 9.3.1 Archivo XML de exposición CHQ..... | 70 |
| 9.3.2 Archivo XML de plano de ruptura 1987..... | 70 |
| 9.3.3 Archivo XML de GMPE..... | 71 |
| 9.3.4 Archivo XML de vulnerabilidad..... | 71 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 9.3.6 Archivo job.ini de riesgo..... | 73 |
|--------------------------------------|----|

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Ángulos de ruptura para el evento sísmico de 1987..... | 32 |
| Tabla 2: Parámetros de ruptura para el evento sísmico de 1987..... | 32 |
| Tabla 3: Coordenadas de la zona de estudio del CHQ..... | 34 |
| Tabla 4: PGA sin variabilidad para el Centro Histórico de Quito..... | 36 |
| Tabla 5: PGA con variabilidad para el Centro Histórico de Quito..... | 37 |
| Tabla 6: PGA para Quito tomando en cuenta el epicentro de 1987..... | 38 |
| Tabla 7: Términos usados en curvas de vulnerabilidad..... | 44 |
| Tabla 8: Medidas de intensidad (IM) según la clase de edificio..... | 44 |
| Tabla 9: Funciones de vulnerabilidad Martins y Silva..... | 45 |
| Tabla 10: Pérdidas según GMPE para el CHQ..... | 50 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Delimitación por manzanas del CHQ..... | 20 |
| Figura 2. Edificaciones según el tipo de ocupación en el CHQ..... | 21 |
| Figura 3. Edificaciones según el material de pared en el CHQ..... | 22 |
| Figura 4. Edificaciones según el material de techo en el CHQ..... | 22 |
| Figura 5. Número y distribución de edificaciones según el número de pisos del CHQ..... | 24 |
| Figura 6. Edificaciones según el número de pisos del CHQ..... | 25 |
| Figura 7. Edificaciones según el sistema resistente a cargas laterales del CHQ..... | 26 |
| Figura 8. Ángulos de ruptura..... | 32 |
| Figura 9. Distribución de PGA [g] sin variabilidad con AkkarBommer2010 en el CHQ..... | 36 |
| Figura 10. Distribución de PGA [g] con variabilidad con AkkarBommer2010 en CHQ..... | 37 |
| Figura 11. Distribución de PGA con AkkarBommer2010 para Quito y epicentro 1987..... | 38 |
| Figura 12. PGA [g] mediante cálculo PSHA en el CHQ..... | 40 |
| Figura 13. Curva vulnerabilidad MUR_Samerica_LWAL-DNO_H1..... | 45 |
| Figura 14. Pérdidas económicas en USD por edificio en el CHQ..... | 49 |
| Figura 16. Pérdidas según tipología constructiva en el CHQ..... | 51 |
| Figura 17. Mapa de pérdidas según tipología constructiva en el CHQ..... | 51 |

ÍNDICE DE FIGURAS – ANEXOS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Distribución de PGA [g] con variabilidad con BooreAtkinson2008 en el CHQ..... | 60 |
| Figura 2. Distribución de PGA [g] con variabilidad con ZhaoEtAl2006 en el CHQ..... | 61 |
| Figura 3. Distribución de PGA[g] sin variabilidad con BooreAtkinson2008 en el CHQ..... | 61 |
| Figura 4. Distribución de PGA[g] sin variabilidad con ZhaoEtAl2006 en el CHQ..... | 62 |
| Figura 5. Distribución de PGA [g] con BooreAtkinson2008 en Quito y epicentro 1987..... | 62 |
| Figura 6. Distribución de PGA [g] con ZhaoEtAl2006 en Quito y epicentro 1987..... | 63 |
| Figura 7. Curva vulnerabilidad CR_LFINF-DUL_H3..... | 64 |
| Figura 8. Curva vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H2..... | 64 |
| Figura 9. Curva vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H5..... | 65 |
| Figura 10. Curva vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H6..... | 65 |
| Figura 11. Curva vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H3..... | 66 |
| Figura 12. Curva vulnerabilidad CR_LWAL-DUL_H1..... | 66 |
| Figura 13. Curva vulnerabilidad CR_LFM-DUM_H4..... | 67 |
| Figura 14. Curva vulnerabilidad CR_LFM-DUM_H3..... | 67 |
| Figura 14. Curva vulnerabilidad MUR-ADO_Samerica_LWAL-DNO_H2..... | 68 |
| Figura 15. Curva vulnerabilidad MUR-ADO_Samerica_LWAL-DNO_H3..... | 68 |
| Figura 16. Curva vulnerabilidad MUR_Samerica_LWAL-DNO_H3..... | 69 |

1. INTRODUCCIÓN

Ecuador se encuentra en la región del Cinturón de Fuego del Pacífico, lugar donde se libera gran porcentaje de energía sísmica en forma de terremoto, derivando un alto nivel de sismicidad en el país. Los sismos de magnitud mayor a 5.0 son frecuentes y causan daños en las estructuras. La fuente principal de generación de sismos tectónicos es la subducción de la Placa de Nazca dentro de la Placa Sudamericana, incluyendo un sistema de fallas locales superficiales, llegando a tener intensidades mayores de magnitudes 7.0 y 8.0 (Yépez, 2001).

La ciudad de Quito se ve afectada por sismos de subducción con hipocentro en el callejón interandino. En los últimos 475 años ha llegado a experimentar intensidades mayores a 6.0 poniendo en peligro a sus habitantes e infraestructuras. Además, el Distrito Metropolitano de Quito ha crecido aceleradamente y de forma desordenada, con construcciones de pobre calidad que hacen que ante un evento sísmico sean vulnerables.

Este documento se enfoca en el Centro Histórico de Quito, en este se encuentran estructuras construidas principalmente de adobe o ladrillo, así como construcciones no ingenieriles e informales. Los edificios antiguos de adobe pueden sufrir daños considerables para intensidades grandes. Por este motivo, se recopila información para poder estimar daños probables que podrían ocurrir en las estructuras después de un terremoto. Para evaluar el riesgo sísmico se procede a realizar un estudio de exposición, amenaza sísmica y vulnerabilidad, caracterizando la probabilidad de ocurrencia de ciertas intensidades sísmicas en un periodo determinado de tiempo usando metodologías de la asociación Global Earthquake Model y su proyecto TREQ.

La fundación público-privada Global Earthquake Model (GEM), fue fundada en el año 2009 en Pavía, Italia. Esta se creó por falta de un programa de monitoreo y cartografía de riesgos de terremotos globales. En el año 2007, MunichRe se convirtió en su primer y

principal participante privado. Su visión es crear un mundo resistente a los terremotos y convertirse en una fuente de recursos de riesgo completa a nivel mundial. Evalúan y gestionan el riesgo sísmico a escala local, nacional, regional y mundial. Promueven el intercambio de software y datos abiertos que crean con sus trabajadores, tales como, OpenQuake (GEM, 2020). Esta plataforma fue lanzada en el 2013, siendo un software computacional de peligros y riesgos sísmicos. OpenQuake se usa para este estudio con el propósito de reducir y gestionar riesgo de desastre.

OpenQuake, es un software gratuito cuyo código es abierto para evaluar peligros y riesgos de eventos sísmicos. Visualiza, manipula, explora un conjunto de datos, modelos y herramientas proporcionados por GEM. Combina peligro y riesgo sísmico en un solo software siendo compatible con modelos de amenaza, vulnerabilidad y exposición. Además, calcula escenarios, análisis probabilísticos, curvas de peligro y campos de movimiento del suelo mediante modelación de fallas. Por último, el proyecto TREQ, diseñado por GEM, se centra en la evaluación de amenaza y riesgo sísmico en América del Sur (SARA), usando modelos de peligros, exposición y vulnerabilidad que permiten estimar pérdidas económicas y humanas. Basándose en este propósito, se procede a realizar el estudio preliminar de riesgo sísmico del centro histórico de la ciudad de Quito.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Realizar el estudio preliminar de riesgo sísmico del centro histórico de Quito (CHQ), aplicando el análisis de eventos históricos puntuales usando el software de la asociación Global Earthquake Model, OpenQuake.

1.1.2 Objetivos específicos

- Recopilar información de las edificaciones del CHQ, mediante bases de datos del Geoportal de Quito, del sistema Metropolitano de Catastro y del Plan de Uso y Ocupación del Suelo.
- Identificar las tipologías estructurales del CHQ según la taxonomía de la plataforma OpenQuake.
- Realizar un estudio de amenaza sísmica probabilística basándose en el evento puntual del 5 de marzo de 1987.
- Realizar estudio de análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA), con la información del proyecto SARA del GEM.
- Estudiar curvas de vulnerabilidad de Martins y Silva (2020) según las tipologías estructurales.
- Analizar conceptos y métodos de riesgo sísmico en el CHQ.
- Determinar posibles pérdidas económicas ante un evento sísmico.

1.2 Justificación

Estimar pérdidas probables y daños que se generarían en el Centro Histórico de Quito en el futuro para estimar posibles reforzamientos para la ciudad. Además, el estudio visiona el análisis de riesgo sísmico mediante un estudio probabilístico que se basa en el evento puntual del 5 de marzo de 1987. Siendo así, poder validar los resultados de este estudio con la información disponible en los catálogos sísmicos. Asimismo, aprobar el estudio mediante eventos estocásticos en la misma zona de estudio.

2. EXPOSICIÓN

Los modelos de exposición son parte fundamental para estimar el riesgo sísmico. Los elementos expuestos se representan por: personas, infraestructuras, recursos, bienes y servicios que son afectados directa o indirectamente por fenómenos naturales, en este caso sismos. La metodología de este trabajo permite generar un modelo dependiendo del tamaño de la zona y de la información con la que se cuenta.

2.1 Generalidades del centro histórico de Quito

El CHQ cuenta con una población de 49,384 habitantes según el Censo Nacional de Población y Vivienda (INEC, 2010). Sin embargo, según la Encuesta Multipropósito del 2016, cuenta con 15,902 habitantes. Por otro lado, fue declarado el primer Patrimonio Cultural de la Humanidad el 8 de septiembre de 1978 por la Unesco debido a su arquitectura, ámbito cultural, esculturas y por ser un digno ejemplo que representa el tipo de construcción de la ciudad.

2.1.1 Administración

El Distrito Metropolitano de Quito se divide en 9 administraciones zonales, con 33 parroquias rurales y 32 parroquias urbanas. La parroquia Centro Histórico de Quito está ubicada al centro sur de la ciudad, cuenta con una superficie de 375.2 km^2 . Tiene 14 barrios: Gonzáles Suárez, La Loma, San Roque, La Merced, Sena, La Recoleta, La Tola, La Victoria, Panecillo, San Blas, San Marcos, San Diego, San Sebastián y La Alameda. Además, se encuentra rodeado por las parroquias La Libertad al oeste, San Juan e Itchimbia al norte, Chimbacalle e Itchimbia al este y La Magdalena al sur. Esta es la tercera división administrativa más pequeña de la ciudad y la primera en cuestión de densidad poblacional con $10,832.2 \text{ hab/km}^2$.

2.1.2 Caracterización de edificaciones

El CHQ está compuesto principalmente de estructuras construidas con adobe o ladrillo, las cuales el 59.41% se consideran en buen estado, es decir, más de la mitad de los pisos, techos y paredes no se encuentran en malas condiciones (INEC, 2010). Sin embargo, el otro 40.59% no cuentan con condiciones aceptables. Asimismo, el tipo de estructuras predominantes son: estructuras con mampostería no reforzada y pórticos de vigas-columnas de hormigón armado (Rivas & Chávez, 2016). Además, en los últimos años se ha dado una desertificación urbana pues hay más estructuras comerciales que viviendas residenciales. Cabe recalcar que alrededor del 60% de estas son estructuras no ingenieriles que se construyeron sin permiso, por lo tanto, sus planos no fueron aprobados.

2.2 Modelo de exposición

La metodología para obtener el modelo de exposición en QGIS, empieza con una base de datos externa georreferenciada obtenida del Geoportal de Quito, del cual se obtiene el mapa de construcciones del CHQ expresado en el número de pisos. Del Sistema Metropolitano de Catastro se obtiene el año de construcción, área de construcción, avalúo y frente. Así también, del Plan de Uso y Ocupación del Suelo se tiene el número de predio. Además, la información requerida para generarlo depende del tipo de modelo, en este caso se recopila datos de materiales de pared y techo y clasificación del sistema resistente a cargas laterales.

2.2.1 Delimitación del caso de estudio

Para el modelo se delimitó el CHQ en cuatro zonas censales con 101 manzanas. Esto abarca la calle Rocafuerte al suroeste, la avenida Pedro Vicente Maldonado al sureste, la calle Francisco de Caldas al noreste y la calle Carchi al noroeste. Abarca el núcleo central y la zona envolvente occidental. Como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Delimitación por manzanas del CHQ
Elaborado por Indyra Delgado

2.2.2 Tipos de ocupación de estructuras

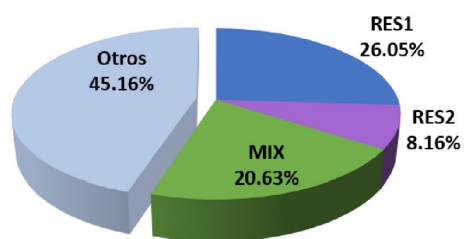
El modelo de exposición cuenta con tres tipos de ocupaciones. El primero es de uso residencial con una sola casa familiar, denominado RES1. De la misma manera, el segundo es residencial, pero de varios departamentos, RES2. Por último, se tiene de uso mixto, es decir, residencial y comercial al cual se lo denomina MIX1.

El total de estructuras que fueron analizadas fue de 2157, de las cuales el 26.05% son RES1, 8.16% son RES2, 20.63% son MIX1 y el porcentaje restante fue excluido de este estudio al ser de uso comercial, institucional o público, como se observa en la figura 2.

Esta información fue verificada en la cédula catastral, refiriéndose a la denominación de la unidad, razón social y destino económico. Además, de una inspección mediante la plataforma Google Earth.



EDIFICACIONES SEGÚN OCUPACIÓN



| Ocupación | #Edificaciones |
|-----------|----------------|
| RES1 | 562 |
| RES2 | 176 |
| MIX | 445 |
| Otros | 974 |

Figura 2. Edificaciones según el tipo de ocupación en el CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

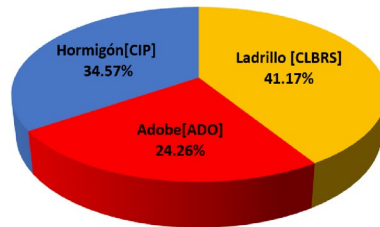
2.2.3 Material de paredes y techo de las edificaciones

Los materiales de paredes que predominan en el CHQ son: ladrillo con 41.17%, adobe con el 24.26%, bloque de hormigón colado in situ con 34.57% de las estructuras estudiadas. Como se observa en la figura 3.

Por otro lado, los materiales de techo predominantes en el estudio son: teja con 45.22%, zinc o asbesto con el 31.78% y concreto con 23.00% de todas las estructuras. Como se muestra en la figura 4.



EDIFICACIONES SEGÚN MATERIAL DE PARED



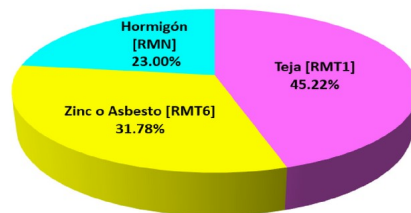
| Material de pared | #Edificaciones |
|---------------------------------|----------------|
| Ladrillo arcilla cocida [CLBRS] | 487 |
| Adobe [ADO] | 287 |
| Hormigón Colado In Situ [CIP] | 409 |

Figura 3. Edificaciones según el material de pared en el CHQ

Elaborado por Indyra Delgado



EDIFICACIONES SEGÚN MATERIAL DE TECHO



| Material de techo | #Edificaciones |
|-----------------------------------|----------------|
| Teja de arcilla u hormigón [RMT1] | 535 |
| Zinc o Asbesto [RMT6] | 376 |
| Hormigón sin revestimiento [RMN] | 272 |

Figura 4. Edificaciones según el material de techo en el CHQ
Elaborado por Indyra Delgado

De igual manera, se pudo identificar los materiales de paredes y techos analizando las estructuras mediante Google Earth. A continuación, se mencionan algunas características de los materiales de paredes:

- **Bloques de Adobe [ADO]**

El adobe se caracteriza por ser una de las técnicas de construcción más antiguas, es mampostería de barro sin cocer, hecha de arcilla y arena, mezclado a veces con paja y secada al sol (Cortijo, 2008). Estas presentan una alta vulnerabilidad sísmica pues hay evidencia de que se derrumban de manera súbita debido a su nulo mantenimiento, a intervenciones inadecuadas sobre la estructura y sobre todo a que las construcciones son hechas de manera precaria y sin conocimientos constructivos.

- **Ladrillos sólidos de arcilla cocida [CLBRS]**

Este material de pared fue el predominante en este estudio, su forma es ortoédrica y su materia prima fundamental es la arcilla cocida o el barro seco. Se lo somete a altas temperaturas de alrededor 750°C a 1300°C para que el agua se evapore y la arcilla se endurezca. El ladrillo se comporta de manera elástico lineal, tienen mejor calidad respecto a ensayos de compresión axial y sirve para construir estructuras de varias plantas. Sin embargo, ante sismos moderados, los muros portantes han demostrado que presentan fallas de corte por agrietamiento.

- **Hormigón Colado In Situ [CIP]**

Este material está compuesto por los siguientes componentes: cemento, agua, áridos y aire, a los cuales se le puede agregar aditivos. Al mezclarlos se produce una masa plástica que es posteriormente compactada para que después de unas horas se torne rígida. Responde bien

a los esfuerzos de compresión, pero no a los demás esfuerzos (Cortijo, 2008). Por esta razón se usa acero para mejorar este problema de tensión. Además, las estructuras de hormigón tienen buena rigidez que minimiza las deformaciones sísmicas y reduce el daño de elementos tanto estructurales como no estructurales. Para que reaccione bien ante acciones sísmicas deben tener cierta ductilidad.

2.2.4 Número de pisos y área de construcción

Es importante tener información del número de pisos y del área de construcción de cada edificación que forma parte del estudio. Esta información fue recopilada mediante la plataforma Google Earth, la cual ha recorrido muchas ciudades del mundo tomando fotografías de las vías.

Para obtener el número de pisos se verificó uno por uno vía Google Earth. Asimismo, el área de construcción se obtuvo de la cédula catastral y se verificó con las herramientas de medición de la plataforma virtual de Google.

De las 1183 estructuras analizadas en el estudio se tiene que la mayoría de las construcciones tienen 2 pisos con un 49.79%. De la misma manera se tiene 14.96% de 1 piso, 27.73% de 3 pisos, 5.41 % de 4 pisos y 2.11% de 5,6 y 7 pisos. Como se aprecia en las figuras 5 y 6.

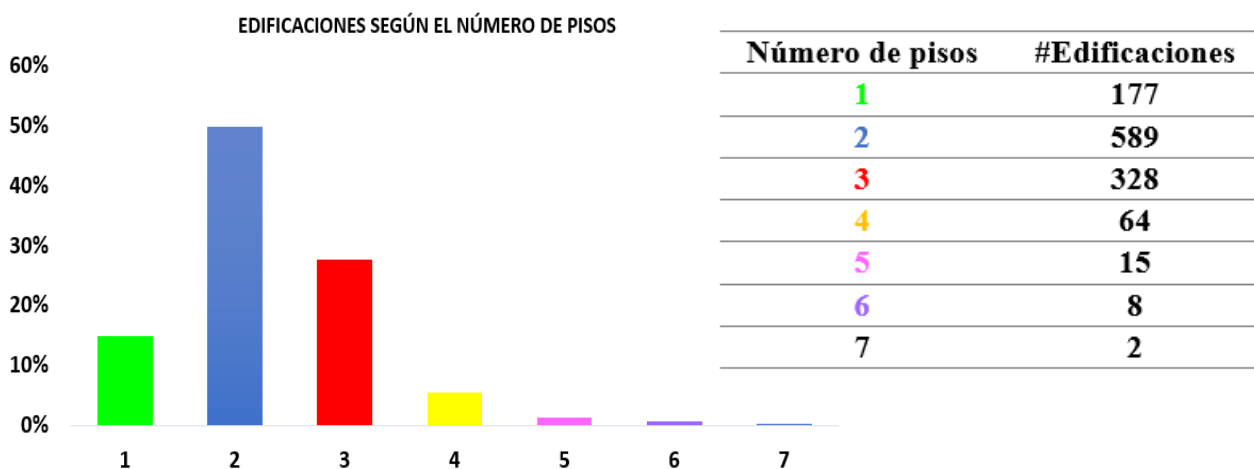


Figura 5. Número y distribución de edificaciones según el número de pisos del CHQ

Elaborado por Indyra Delgado



Figura 6. Edificaciones según el número de pisos del CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

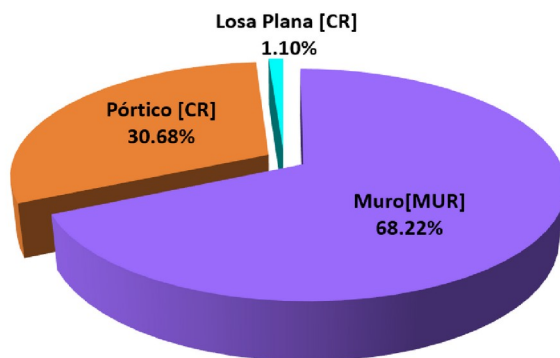
2.2.5 Sistemas estructurales resistente a cargas laterales

De la misma manera que para el número de pisos, se utiliza la información proporcionada por Google Earth y de la cédula catastral para inspeccionar las construcciones y poder determinar su sistema estructural. Clasificando las edificaciones en tres tipos de sistemas de resistencia a carga lateral: muros, pórticos y losas planas. Esto se determinó según el número de pisos y el material de paredes de las estructuras.

En el CHQ, la gran mayoría de construcciones son de mampostería no reforzada con un 68.22%, el sistema de pórticos de hormigón armado con 30.68% y losas planas 1.1%. Como se muestra en la figura 7.



EDIFICACIONES SEGÚN SISTEMA RESISTENTE A CARGAS LATERALES



| Sistema | #Edificaciones |
|-------------------|----------------|
| Muros [MUR] | 807 |
| Pórtico [CR] | 363 |
| Losas Planas [CR] | 13 |

Figura 7. Edificaciones según el sistema resistente a cargas laterales del CHQ

Elaborado por: Indyra Delgado

- **Muros, mampostería no reforzada [MUR]**

Estos sistemas no disponen de un pórtico completo y no tienen ningún tipo de refuerzo. Es concebido para resistir cargas verticales y son buenos para trabajar en compresión, pero se ven afectados por cargas horizontales como el sismo, por lo que se exige considerar resistencia a corte y tensión (Alcocer, 1997). Además, su respuesta dinámica depende de la resistencia, rigidez y ductilidad de la estructura, lo que no se ve evidenciado en

las estructuras del CHQ. Se tiene que las construcciones de uno a tres pisos caen en esta categoría, así como aquellas que tienen ladrillo o adobe como material de pared.

- **Pórticos de hormigón armado [CR]**

Este sistema es resistente a momentos, completo, sin diagonales que resisten fuerzas horizontales y cargas verticales. Estructuras de hormigón armado con dosificación columnas-vigas conectados a través de nudos. Soportan cargas muertas, flexibles que atraen solicitaciones sísmicas pequeñas y disipan gran cantidad de energía debido a que poseen ductilidad en sus elementos (Aguiar, Bozzo, Barbat, & Canas, 1996). Sin embargo, tiene problemas con baja rigidez a cargas laterales y su flexibilidad permite grandes desplazamientos, causando daños en elementos estructurales y no estructurales. Además, su uso se limita a estructuras bajas o medianas.

Por otro lado, un 82.37% de las estructuras de pórticos de hormigón armado del CHQ presentan ductilidad, es decir, experimentan deformaciones más allá del límite elástico sin reducir importancia en resistencia y rigidez. El porcentaje restante es vulnerable ante eventos sísmicos.

- **Losas planas [CR]**

Son sistemas de construcción de concreto armado que transmiten cargas directamente de las columnas sin la necesidad de colocar vigas. No es adecuada para zonas de riesgo sísmico alto debido a que, en un sismo, al no tener paredes de cemento reforzadas ni soportes laterales, los edificios tienden a moverse demasiado. Las conexiones losas y columnas suelen generar derrumbes. En el CHQ, no existe gran cantidad de este tipo de edificaciones.

Cabe recalcar que de las 1183 edificaciones estudiadas el 26.54% son dúctiles y el 73.46% no poseen ductilidad, haciendo al CHQ un área muy vulnerable.

3. AMENAZA SÍSMICA

La amenaza sísmica caracteriza numéricamente la probabilidad en términos estadísticos de la excedencia de intensidades sísmicas en un determinado sitio en un periodo de tiempo.

3.1 Historia sísmica de Ecuador

Ecuador se encuentra en la costa oriental del Océano Pacífico, formando parte del llamado “Cinturón de Fuego del Pacífico”. Esta región es susceptible a experimentar terremotos pues presentan cambios en la superficie del planeta debido a una respuesta de interacción entre placas tectónicas. Las placas Sudamericana y Nazca generan zonas de subducción en el plano de Benioff, la cual es la principal fuente sísmica para el país. La segunda fuente sísmica para el país es de tipo falla cortical, es decir, superficiales de poca profundidad (Rivadeneira, y otros, 2007) . Además de esta falla, existen dos secundarias: Quito-Latacunga y Subandina Oriental.

En cada una de estas fuentes sismogénicas se acumula y libera energía. La fuente de subducción son de tipo intraplaca e interplaca. Los sismos intraplaca tienen de 40 a 300 km de profundidad. Mientras que los sismos interplaca tienen 40 km de profundidad y se generan en su zona de convergencia. Por otro lado, los sismos corticales tienen profundidades no mayores a 40 km, de foco superficial (Falconí, García, & Villamarín, 2010).

3.2 Sismicidad de la ciudad de Quito

La ciudad de Quito se ve amplificada por varias fallas geológicas, actividad neotectónica, acciones de subducción, acciones corticales y volcánicas. Se ubica a lo largo de la Cordillera de los Andes, la cual se delimita por la falla de Quito o falla EC-3 por el este, el volcán Casitagua por el norte, faldas de Pichincha por el Oeste y el volcán Atacazo al sur.

3.2.1 Falla de Quito

En los últimos 460 años, Quito ha registrado varios eventos telúricos destructivos. Dentro de estas fuentes sismogénicas que generaron daños en la ciudad se tiene la falla de Quito. Esta falla es una fractura que se encuentra sobre la corteza terrestre y se caracteriza por provocar que la zona principal de la ciudad se levante aproximadamente 400 m sobre los valles de Los Chillos y Tumbaco, siendo una falla de tipo inversa cortical que es producida por la compresión de la placa Nazca contra la placa Sudamericana. Además, su longitud es de aproximadamente 60 km, la cual se divide en tres segmentos y se origina al sur, en el sector Santa Rosa y va hasta San Antonio de Pichincha, ubicado en la mitad del mundo (Baize, y otros, 2020). La falla de Quito se encuentra inmersa en una cadena de colinas: El Tablón, Lumbisí, Puengasí, Batán-La Bota, Calderón-Bellavista, Carcelén-El Inca y Catequilla.

El Centro Histórico de Quito se encuentra en el centro sur de la ciudad, asociado a la falla de Puengasí. Además, muestra actividad micro sísmica constante con magnitudes superiores o iguales a 4 grados en la escala de Richter, y se estima que se podría producir un sismo entre 6 y 7 de magnitud. Por lo que es de suma importancia que la ciudadanía se prepare para un posible evento sísmico superficial.

3.2.2 Sismos históricos de Quito

Históricamente, Quito fue afectado por varios sismos de magnitud alta como los eventos de 1541, 1587, 1755, 1797, 1859 y 1868, 1914, 1923, 1929, 1938, 1987, 1990 y 2014, etc (Quito, 2012). Estos sismos causaron víctimas, destrucción de viviendas, iglesias, conventos. El sismo de 1987, cuyo epicentro fue en la región amazónica causó fisuras en cúpulas y torres de las iglesias, afectando de manera drástica el Centro Histórico de Quito, el cual es punto de interés de este estudio.

3.2.3 Sismo del 5 de marzo de 1987

El jueves 5 de marzo de 1987 se produjeron dos sismos de magnitudes 6.9 y 6.1 a lo largo de las faldas orientales de los Andes, ubicado en el noroeste del país. Los epicentros fueron ubicados en la provincia de Napo, a 75 km de la ciudad de Quito y a 25 km del volcán Reventador. Estos eventos se ubicaron en la intersección de fallas transcurrentes con fallas inversas del frente Andino, con foco superficial. Este evento causó innumerables daños estructurales en edificaciones del CHQ, afectando las cúpulas y torres de las iglesias San Agustín, La Merced y el Belén, en especial por ser de material de adobe no dúctil (HALL, 2000).

3.3 Metodología para el cálculo de amenaza sísmica

Recurrencia sísmica es la distribución de números con distintas magnitudes, que ocurren dentro de un área y tiempo especificados. Se expresa en función de la relación entre magnitud y frecuencia de la ley de Gutenberg Richter.

$$\log N = a - b M$$

N es el número de sismos con una magnitud igual o superior que M, a y b describen la sismicidad de una región y M es la magnitud del sismo calculado. Para realizar este estudio es importante contar con catálogos sísmicos actualizados en donde se tiene una compilación de eventos históricos instrumentales registrados en un periodo de tiempo.

3.4 Modelación del movimiento del terreno

Para conocer cómo se comporta el terreno ante un evento sísmico se necesita modelar mapas que ayudan a entender si los escenarios pudiesen llegar a causar daños y si es necesario un análisis de riesgo sísmico para la zona de estudio.

3.4.1 Mecanismos de falla

Una falla es un plano de discontinuidad en la corteza terrestre que se da cuando dos bloques de tierra quieren moverse independientemente uno del otro. Este se divide en tres tipos de fallas:

- **Falla normal:** Se tiene un movimiento de separación, en donde un pedazo de la falla cae con respecto al otro, es decir, los bloques se alejan entre sí.
- **Falla inversa:** Los bloques se comprimen entre sí, uno encima de otro.
- **Falla de transformación:** Los bloques se mueven independientemente uno del otro, se desplazan lateralmente, sin ejercer tensión o compresión significativa.

3.4.2 Parámetros de ruptura

Una ruptura es una porción de área de falla que se desprende al haber un evento sísmico. Para definir el movimiento del terreno y su ruptura se necesita de tres ángulos y un vector de movimiento que describen el desplazamiento del bloque:

- **Strike:** Este ángulo corresponde al rumbo de la falla, el cual se mide en un plano horizontal con sentido horario y cuyo origen está en el norte.
- **Dip:** A este ángulo se lo conoce también como buzamiento del plano de falla. Se mide en el plano vertical y hacia abajo del plano horizontal hasta el plano de falla. Es decir, es el ángulo que se forma entre la superficie terrestre y el plano de discontinuidad.
- **Rake:** Ángulo de deslizamiento o movimiento que describe la rotación del bloque superior relativo con respecto al bloque inferior de la falla. Se mide desde la horizontal del plano de falla hasta la nueva ubicación del plano.

- **Slip:** Este es un vector que proporciona la dirección del movimiento del bloque que se desprende en la ruptura.

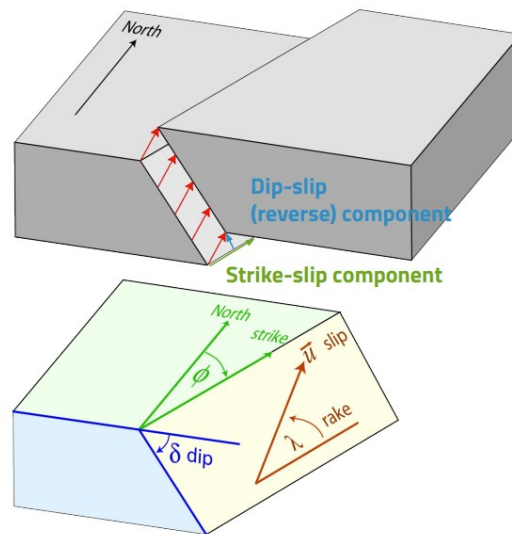


Figura 8. Ángulos de ruptura (GEM, 2020)

Tabla 1: Ángulos de ruptura para el evento sísmico de 1987

| Ángulos de ruptura 1987 | |
|--------------------------------|--------|
| Strike | 6.07° |
| Dip | 75.03° |
| Rake | 45.05° |

Además de los ángulos es necesario saber qué tipo de falla, magnitud, profundidad y ubicación tiene la ruptura para calcular la intensidad con la que se agita el terreno debido al evento sísmico. En este caso, para el sismo de 1987 se tiene que la falla fue de tipo inversa transcurrente, es decir que se tuvo esfuerzos compresivos en la corteza terrestre (Quito, 2012).

Tabla 2: Parámetros de ruptura para el evento sísmico de 1987

| Parámetros de ruptura evento 1987 | |
|--|---------|
| Magnitud | 6.9 |
| Profundidad | 12 km |
| Latitud | -77.84° |
| Longitud | -0,087° |

3.4.3 Ecuaciones de movimiento del terreno (GMPE)

Las ecuaciones predictivas del movimiento del terreno especifican la entrada de la región que es importante para el análisis de amenaza e intentan predecir qué tan fuerte se sentirá la agitación del suelo en caso de un sismo. Además, proporciona incertidumbre asociada al sitio en función de la magnitud del terremoto, distancia de la fuente al sitio y al suelo local.

Para el caso del Centro Histórico de Quito se consideran tres GMPE's: Akkar and Bommer, 2010, Boore and Atkinson, 2008, y Zhao et al.,2006. Los cuales son utilizados en el estudio de Amenaza Sísmica en Quito (Cañizares & Singaicho, 2017).

- **AkkarBommer2010:** Los coeficientes de PGA y del espectro de aceleración (S_a) se han tomado en cuenta extendiendo las ecuaciones de predicción del movimiento para frecuencias de respuesta alta.
- **BooreAtkinson2008:** Se enfoca en ecuaciones de predicción de un enfoque empírico, además, toma en cuenta frecuencias para el movimiento medio del suelo y sismos de poca profundidad.
- **ZhaoEtAl2006:** Utiliza clasificación de sitios de periodo predominante, para eventos de corteza superficial activa.

3.5 Modelación de los mapas de movimiento del suelo

Para generar los mapas se utilizan dos softwares de uso libre: OpenQuake y QGIS.

3.5.1 Ruptura del terremoto

En primer lugar, se modela la ruptura del sismo con los parámetros antes mencionados para el evento puntual de 1987. En el cual se incluye magnitud, rake, ubicación y profundidad del hipocentro. Además, se define el tipo de ruptura, en este caso se tiene una ruptura de falla

arbitraria que necesita como datos de entrada los ángulos strike y dip. Según estos datos de entrada, OpenQuake calcula una geometría de la ruptura arbitraria.

3.5.2 Sitios de peligro

Para obtener el escenario del terreno, se utilizan cálculos estadísticos de daños a partir de la ruptura sísmica, teniendo en cuenta variabilidad aleatoria o epistémica del movimiento del suelo. Así pues, se ingresa el sitio de peligro a estudiar, en este caso mediante una cuadrícula de región definida por coordenadas.

Tabla 3: Coordenadas de la zona de estudio del CHQ

| Longitud | Latitud |
|-----------|----------|
| -78.52034 | -0.21930 |
| -78.51634 | -0.21485 |
| -78.51684 | -0.21298 |
| -78.51389 | -0.21007 |
| -78.50630 | -0.21526 |
| -78.50432 | -0.21672 |
| -78.51043 | -0.22504 |
| -78.51288 | -0.22646 |

3.5.3 Condiciones del sitio

En este estudio se utilizan parámetros de sitio uniformes. El tipo de suelo del CHQ presenta características medias de rigidez, con una roca que cumple el criterio de velocidad de onda cortante. Para este estudio se tiene:

- **VS30 (m/s):** La velocidad media de las ondas de corte en los primeros 30 metros de terreno, se escoge 760 m/s, suelo tipo C según la NEC15.
- **Profundidad mínima VS30 \geq 1 km/s (m):** La distancia vertical desde la superficie terrestre hasta donde las ondas sísmicas empiezan a propagarse con una velocidad mayor a 1 km/s, se escoge por defecto de 100 metros.

- Profundidad mínima $VS_{30} \geq 2.5$ km/s (km): Se escoge 2 km por defecto.

3.5.4 Parámetros de cálculo

En esta sección se definen los parámetros y las medidas de intensidad, así como la variabilidad y el nivel de truncamiento del movimiento del suelo. En este caso se tiene:

- **GMPE:** Ecuaciones de predicción del movimiento del suelo, especificadas anteriormente.
- **IMT:** Los tipos de medidas de intensidad que se generan en los campos de movimiento del suelo. En este caso es de interés el PGA.
- **Modelo de correlación:** Al tener variabilidad el modelo a usar es JB2009.
- **Nivel de truncamiento:** Este parámetro sirve para incluir incertidumbre en la intensidad del movimiento del terreno. En el caso de variabilidad se utilizó 3 desviaciones estándar de la media y al no tener variabilidad se utiliza 0.
- **Distancia máxima de la fuente al sitio (km):** Esta distancia se toma en cuenta desde la fuente hasta una distancia de elementos expuestos. Para el caso del CHQ, se determina una distancia de 300 km.
- **Número de campos de movimiento del suelo:** El número de movimientos que se generarán. Con variabilidad se generan 300 simulaciones por cada movimiento del terreno, sin variabilidad es suficiente contar con 1 campo.

3.6 Análisis sísmico mediante mapas de movimiento del suelo

Un campo de movimiento del terreno es la distribución de la intensidad de agitación en el espacio, describe la intensidad con la que se siente el movimiento del suelo en una serie de lugares definidos por longitud y latitud (GEM, 2020).

3.6.1 Aceleraciones PGA del CHQ

El PGA, Peak Ground Acceleration, es el promedio de la aceleración máxima absoluta de cada registro de aceleración del suelo. En Quito para el evento sísmico del 5 de marzo de 1987 se registró un PGA de 0.06g (Albornoz, 2013).

Tomando en cuenta los parámetros mencionados anteriormente se obtienen los siguientes valores de PGA:

Tabla 4: PGA sin variabilidad para el Centro Histórico de Quito

| Rangos de PGA sin variabilidad CHQ | | |
|------------------------------------|------------------|-----------------|
| AkkarBommer201 | BooreAtkinson200 | ZhaoEtAl200 |
| 0 | 8 | 6 |
| 0.06 g - 0.06 g | 0.08 g - 0.08 g | 0.07 g - 0.08 g |
| | | g |

Según la tabla 4, la ecuación de atenuación que se asemeja a la realidad es de AkkarBommer 2010, arrojando valores de 0.06g sin tomar en cuenta la variabilidad, como se observa en la figura 9.

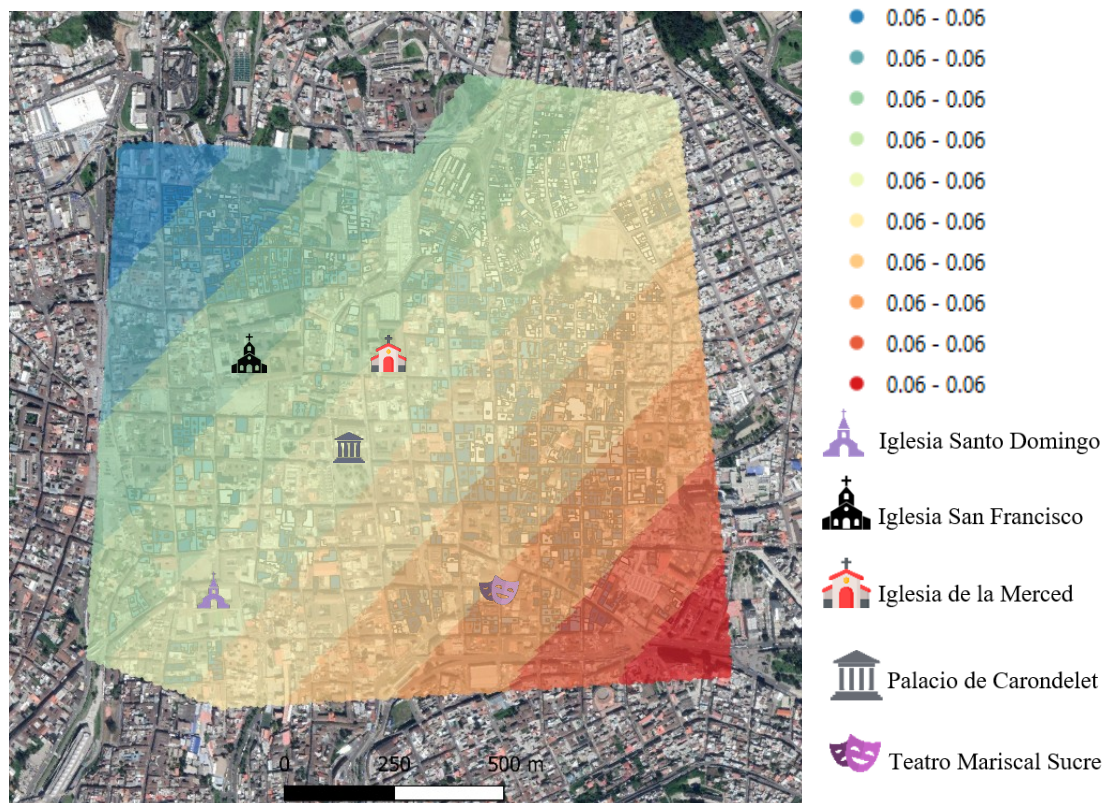


Figura 9. Distribución de PGA [g] sin variabilidad con AkkarBommer2010 en el CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

Para tener en cuenta la incertidumbre, se toma 3 desviaciones estándar de la media:

Tabla 5: PGA con variabilidad para el Centro Histórico de Quito

| Rangos de PGA [g] con variabilidad CHQ | | |
|--|------------------|-------------|
| AkkarBommer201 | BooreAtkinson200 | ZhaoEtAl200 |
| 0 | 8 | 6 |
| 0.05-0.07 | 0.06-0.08 | 0.06-0.07 |
| 0.07-0.08 | 0.08-0.09 | 0.07-0.09 |
| 0.08-0.09 | 0.09-0.10 | 0.09-0.11 |
| 0.09-0.11 | 0.10-0.11 | 0.11-0.12 |
| 0.11-0.12 | 0.11-0.13 | 0.12-0.14 |
| 0.12-0.14 | 0.13-0.14 | 0.14-0.16 |
| 0.14-0.15 | 0.14-0.15 | 0.16-0.17 |
| 0.15-0.16 | 0.15-0.16 | 0.17-0.19 |
| 0.16-0.18 | 0.16-0.18 | 0.19-0.20 |
| 0.18-0.19 | 0.18-0.19 | |

La tabla 5 muestra los valores de PGA para las tres GMPE, siendo AkkarBommer2010 la ecuación que mejor representa la realidad, se puede llegar a tener hasta 0.19 g en ciertas zonas cercanas al Teatro Mariscal Sucre, pero la mayoría de las edificaciones sentiría en promedio 0.13g de aceleración, como se muestra en la figura 10.

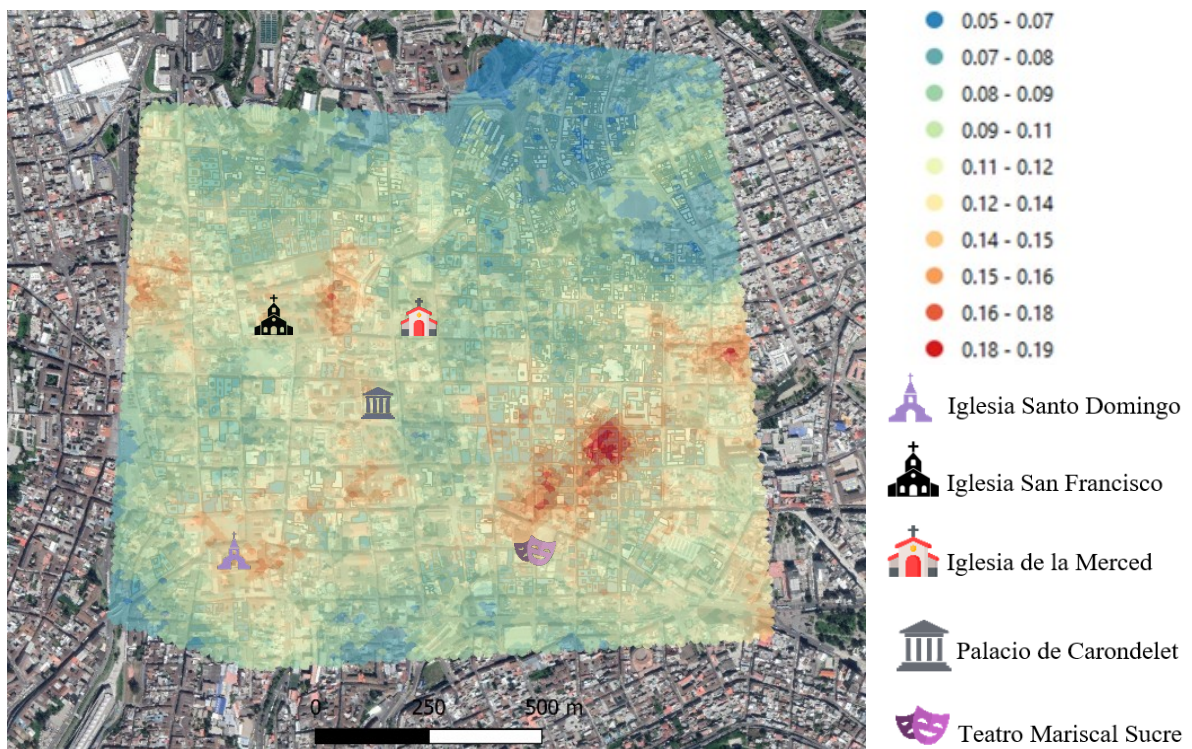


Figura 10. Distribución de PGA [g] con variabilidad con AkkarBommer2010 en CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

Para tener una mejor perspectiva de cómo podría afectar un evento similar al del 5 de marzo de 1987, se toma en cuenta a Quito y al epicentro.

Tabla 6: PGA para Quito tomando en cuenta el epicentro de 1987

| Rangos de PGA [g] desde el epicentro | | |
|--------------------------------------|-----------------|-------------|
| AkkarBommer20 | BooreAtkinson20 | ZhaoEtAl200 |
| 10 | 08 | 6 |
| 0.05-0.09 | 0.06-0.11 | 0.06-0.09 |
| 0.09-0.13 | 0.11-0.16 | 0.09-0.12 |
| 0.13-0.16 | 0.16-0.21 | 0.12-0.15 |
| 0.16-0.20 | 0.21-0.25 | 0.15-0.18 |
| 0.20-0.23 | 0.25-0.30 | 0.18-0.21 |
| 0.23-0.27 | 0.30-0.35 | 0.21-0.23 |
| 0.27-0.31 | 0.35-0.40 | 0.23-0.26 |
| 0.31-0.34 | 0.40-0.44 | 0.26-0.29 |
| 0.34-0.38 | 0.44-0.49 | 0.29-0.32 |
| 0.38-0.42 | 0.49-0.54 | 0.32-0.35 |

La tabla 6 muestra que se tiene hasta un PGA de 0.42 g en el epicentro y se va atenuando con la distancia según AkkarBommer2010, como se muestra en la figura 11.

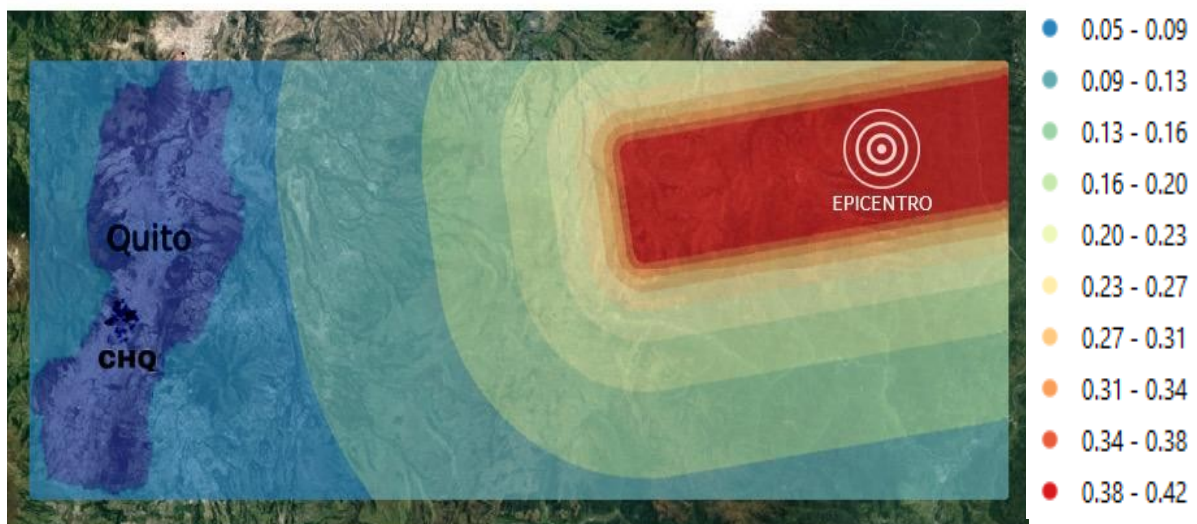


Figura 11. Distribución de PGA con AkkarBommer2010 para Quito y epicentro 1987

Elaborado por Indyra Delgado

En la figura 11 se tiene que el CHQ tiene aceleraciones máximas de alrededor 0.05g a 0.09g como se observa igualmente en la figura 9.

3.7 Análisis sísmico mediante PSHA

Al estudiar eventos sísmicos se tiene incertidumbres para predecir ocurrencias y no se cuenta con un catálogo extenso, por este motivo se realiza un análisis probabilístico de amenaza sísmica, PSHA. Este estudio no se centra en un evento puntual sino involucra incertidumbres en cuanto a magnitud, distancia, considerando todos los posibles eventos y la ocurrencia de cada uno. Este análisis se realiza con el proyecto SARA de GEM.

3.7.1 Proyecto SARA

El proyecto South America Risk Assessment es promovido por GEM, el cual calcula amenaza y riesgo a partir de escenarios seleccionados: Quito, Lima, Medellín, Iquique, Osorno y Rancagua. Toma en cuenta estado de fallas activas, fallas de subducción, catálogos sísmicos, GMPEs, bases de datos de exposición, fragilidad y vulnerabilidad (GEM, 2020).

Para el modelo SARA se desarrolló un modelo probabilístico PSHA que cubre el continente suramericano, contiene bases de datos con zonas de exposición, curvas de vulnerabilidad y distintos parámetros que ayudan a cuantificar el riesgo sísmico que se obtuvieron de diversos catálogos sísmicos.

3.7.2 Datos de entrada y salida para PSHA

- **GMPEs:** Para el proyecto SARA se usan regiones de subducción intraplaca, fallas de corteza activas poco profundas, cortezas estables por lo que se requieren de ecuaciones como AtksonBoore2006, MontalvaEtAl2016, etc.
- **Parámetros de sitio:** Los parámetros utilizados para el movimiento de terreno como vs30 de 760 m/s, y las distancias a 5km y 100km.

- **Periodo de retorno:** Tiempo en el que la falla almacena energía para liberarla, se toma el periodo de diseño el cual es de 475 años según la NEC15.
- **Probabilidad anual de excedencia:** Se toma la probabilidad de diseño especificada den la NEC15, la cual es 0.002105.

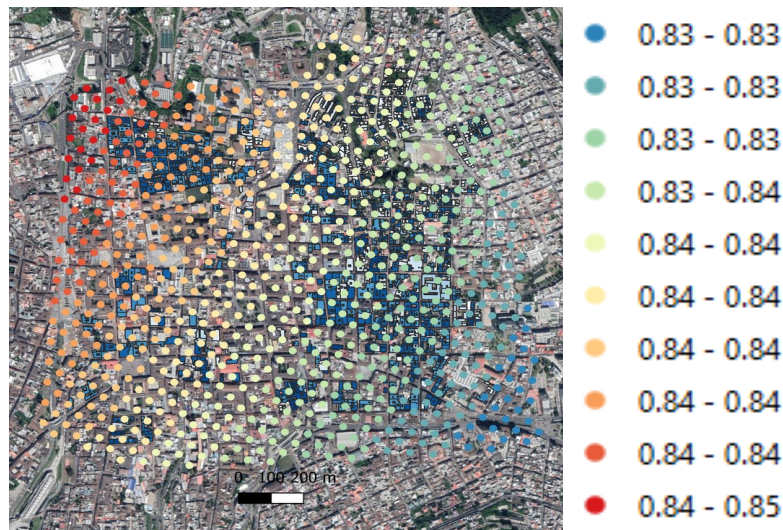


Figura 12. PGA [g] mediante cálculo PSHA en el CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

En la figura 12 se tiene valores de aceleración de 0.83g a 0.85 g en la zona del Centro Histórico de Quito para un periodo de retorno de 475 años ya que es importante disponer de intervalos grandes de tiempo para considerar sismos de gran magnitud, aunque sean menos frecuentes. Cabe recalcar que se necesita una serie de estudios sísmicos para llegar a caracterizar una zona por su intensidad, tal como lo hace la NEC. Asimismo, es importante realizar estudios de riesgo sísmico para la ciudad debido a que los valores de PGA obtenidos en los estudios caracterizan a Quito como una zona de peligro sísmico alto.

4. VULNERABILIDAD

Un factor importante para estudiar las causas de daños en edificaciones provocados por sismos es el inadecuado comportamiento de las estructuras, por lo que es relevante estudiar el grado de vulnerabilidad que tiene cada configuración estructural.

4.1 Vulnerabilidad sísmica

Se conoce como vulnerabilidad sísmica al grado de pérdidas que sufre una estructura después de presenciar un evento sísmico. Se debe tomar en cuenta que este término es una propiedad intrínseca de la estructura y es independiente de la amenaza del lugar. Es decir, una estructura puede ser vulnerable, pero no podría estar en riesgo al no encontrarse en un lugar con determinada amenaza sísmica (Caicedo, Barbat, Canas, & Aguiar, 1994).

De la misma manera, la vulnerabilidad estructural se refiere a que tan susceptible es una estructura para tener pérdidas frente a fuerzas inducidas en la misma. Es de suma importancia tener un correcto diseño estructural sismorresistente para que las estructuras sobrevivan ante desastres naturales, como los sismos. Desafortunadamente, en Ecuador muchos casos constatan que las normas y los criterios ingenieriles no fueron aplicados correctamente.

4.2 Vulnerabilidad sísmica estructural en Quito

La primera evaluación de vulnerabilidad para la ciudad fue realizada en 1994 por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. En esta se realizó un inventario de edificaciones y estados de infraestructuras esenciales. Toda la información fue compilada en un sistema geográfico denominado Savanne, desarrollado por Orstom de Francia (Yépez, 2001). Las

edificaciones de la ciudad fueron agrupadas y clasificadas por el material predominante de construcción, así como el tipo de estructura.

Para Quito, se obtuvo que el porcentaje de construcción informal predomina con alrededor de un 42%, después se tiene que varias estructuras están hechas de hormigón armado, mampostería, entre otros. Asimismo, el crecimiento desordenado y acelerado de la ciudad genera el incremento de edificaciones de calidad pobre de construcción que se esparcen hasta laderas inestables, quebradas, rellenos, etc.

En el Centro Histórico se aprecian estructuras construidas principalmente de adobe, tapial, ladrillo y en ciertas partes se tiene hormigón armado tipo losa plana, el cual presenta un comportamiento sísmico deficiente, es decir, se tienen construcciones históricas con gran vulnerabilidad. El porcentaje de estructuras sin criterio ingenieril puede llegar fácilmente al 70% del total, por lo que hace al Centro Histórico altamente vulnerable desde el punto de vista sísmico (Hora, 2010).

4.3 Análisis estático no lineal pushover (APA)

Esta técnica ayuda a encontrar la respuesta sísmica de las estructuras, incorpora características no lineales de los materiales y al combinarse con niveles de desempeño, considera el comportamiento de la estructura para diferentes intensidades sísmicas. Además, estima la capacidad horizontal de la estructura teniendo en cuenta su propia deformación y su contenido de frecuencias. El análisis Pushover consiste en llevar al colapso a las estructuras mediante un patrón de cargas laterales incrementales y cargas constantes gravitacionales. (Agostini & Gerbaudo, 2018).

Este método permite comprender como trabajan las estructuras al ser sometidas a eventos sísmicos cuando sobrepasan su capacidad elástica. El nivel de daño se evalúa

mediante parámetros de respuesta como derivas de piso o pseudo aceleraciones que se aplican a funciones de fragilidad en componentes estructurales individuales.

4.4 Análisis dinámico incremental (IDA)

Este método evalúa vulnerabilidad y riesgo sísmico en edificaciones. Calcula el daño global para distintas aceleraciones máximas del suelo y representa el resultado mediante curvas de daño. La estructura se somete a una serie de análisis denominados time-history, es decir, se amplifica de manera progresiva la aceleración máxima del suelo (PGA) desde valores bajos de respuesta elástica hasta llegar a un estado límite post-fluencia ya definido.

Consiste en una serie de análisis no lineales, los cuales varían con un factor de escala obtenido de los acelerogramas. Estos se seleccionan de tal manera que cubran la parte elástica del comportamiento estructural hasta que llega a colapsar (Tavárez, 2016). El objetivo de este método es obtener resultados para cada nivel de intensidad del suelo para crear curvas continuas que muestran la exigencia que se impone a las edificaciones en función de la intensidad.

4.5 Modelos de vulnerabilidad

Los modelos representan la relación entre la intensidad de agitación del terreno y el porcentaje de pérdidas de valor u ocupantes afectados. Es decir, cuanto valor económico se pierde del valor expuesto.

La vulnerabilidad caracteriza el comportamiento de las estructuras ante posibles ocurrencias de eventos sísmicos, de acuerdo con las propiedades físicas de las edificaciones. Por otro lado, expertos unieron esfuerzos y construyeron varios modelos de vulnerabilidad en los cuales se muestra que el porcentaje de pérdida es directamente proporcional a la intensidad del terreno. Debido a que el enfoque de este estudio no es desarrollar curvas de

fragilidad, se optó por escoger curvas desarrolladas por otros investigadores, en este caso por Luis Martins y Victor Silva (Martins & Silva , 2020).

4.5.1 Identificación de tipologías estructurales en el CHQ

Para definir estos parámetros, la fundación GEM clasificó las construcciones en función del material de construcción, sistema resistente a cargas laterales, nivel de ductilidad y número de pisos. Para este estudio se tiene los siguientes términos.

Tabla 7: Términos usados en curvas de vulnerabilidad

| Término | Definición |
|----------------|------------------------------|
| MUR | Mampostería no reforzada |
| CR | Hormigón armado |
| MUR-ADO | Muro de adobe |
| LFM | Marcos resistente a momentos |
| LFINF | Marcos inflados |
| LWAL | Sistemas de pared |
| DUL | Ductilidad baja |
| DUM | Ductilidad media |
| DUH | Ductilidad alta |
| DNO | No dúctil |

4.5.2 Evaluación de vulnerabilidad según Martins y Silva

Para obtener las curvas de vulnerabilidad Martins y Silva emplearon un análisis histórico de tiempo no lineal en osciladores equivalentes a un grado de libertad. Siendo así, para seleccionar el registro de movimiento del terreno tomaron en cuenta registros de acelerogramas de entornos de subducción y corticales. Las medidas de intensidad toman en cuenta las propiedades dinámicas de las distintas clases de edificaciones. Las medidas se determinan según los parámetros de la tabla 8.

Tabla 8: Medidas de intensidad (IM) según la clase de edificio

| IM | Tipo de estructura |
|-----------|--------------------------------------|
| PGA | Estructuras rígidas de poca altura |
| Sa (0.3s) | Estructuras de baja y mediana altura |
| Sa (0.6s) | Estructuras de media altura |

Por otro lado, para definir las oscilaciones de un sistema de un grado de libertad por cada clase de edificio, definieron en función de valores asociados a curvas de capacidad en términos de la aceleración espectral (S_a) versus el desplazamiento espectral (S_d). Además, se validaron las funciones de vulnerabilidad a través de series de pruebas que incluyen cálculos de tasa de siniestralidad media anual para un número de ubicaciones, comparación de probabilidades de colapso y repetición de eventos sísmicos pasados.

Para este estudio se toma en cuenta 12 modelos de vulnerabilidad:

Tabla 9: Funciones de vulnerabilidad Martins y Silva

| Funciones de vulnerabilidad | % CHQ |
|------------------------------|--------|
| CR_LFINF-DUL_H3 | 5.41% |
| CR_LFINF-DUM_H2 | 17.33% |
| CR_LFINF-DUM_H6 | 2.45% |
| CR_LFINF-DUM_H5 | 2.79% |
| CR_LFINF-DUM_H3 | 3.80% |
| CR_LWAL-DUL_H1 | 2.62% |
| CR_LFM-DUM_H4 | 0.08% |
| CR_LFM-DUM_H3 | 0.08% |
| MUR-ADO_Samerica_LWAL-DNO_H2 | 16.40% |
| MUR-ADO_Samerica_LWAL-DNO_H3 | 7.86% |
| MUR_Samerica_LWAL-DNO_H1 | 30.94% |
| MUR_Samerica_LWAL-DNO_H3 | 10.23% |

De las 12 clases de edificios, la MUR_Samerica_LWAL-DNO_H1, es la que más se encuentra en el CHQ, su curva de vulnerabilidad se observa en la figura 13.

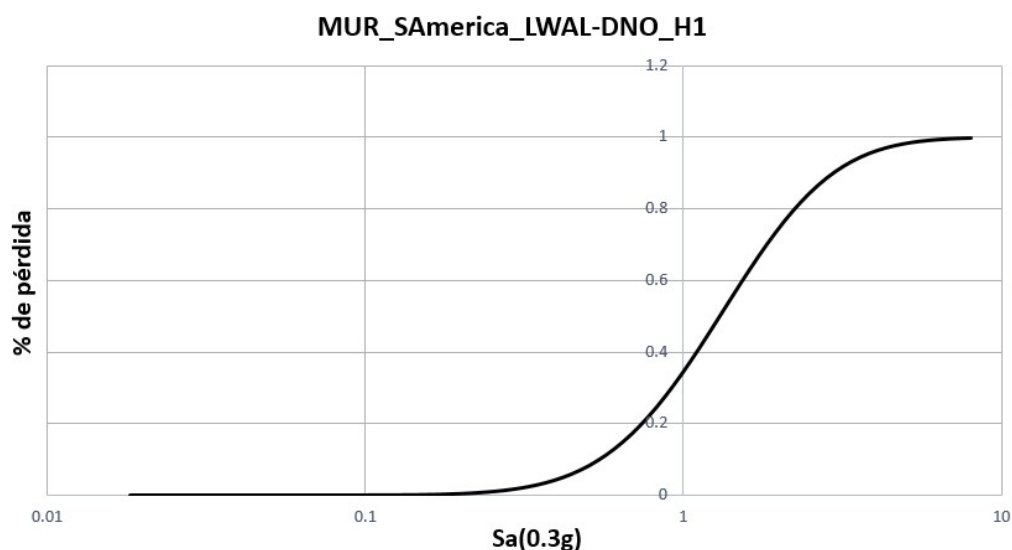


Figura 13. Curva vulnerabilidad MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H1 (Martins & Silva , 2020)

La figura 13 muestra la curva de vulnerabilidad, funciones continuas, de estructuras cuya taxonomía es MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H1. La vulnerabilidad sísmica se ve influenciada por características mecánicas de los materiales, configuración estructural, y su geometría. Según la taxonomía de GEM son estructuras de mampostería no reforzada, cuyo material de pared son bloques de ladrillo. Además, su sistema estructural pertenece a la categoría de muro no dúctil de uno a dos pisos. En el eje de las abscisas se tiene la intensidad de movimiento del terreno en términos de aceleración espectral la cual indica que, a mayor intensidad, mayor será el índice de daño. Estas curvas muestran una región lineal elástica que finaliza cuando los elementos estructurales llegan al fin de su estado elástico. Por otro lado, los cambios de pendiente representan rigidez elástica.

Las funciones especificadas en la Tabla 7 incluyen las diferentes taxonomías consideradas en el modelo de exposición y sus modelos se encuentran en el anexo B.

5. RIESGO

El riesgo sísmico representa aquellas consecuencias económicas provocadas por un sismo, este ocurre al haber un traslape temporal y espacial de exposición, amenaza y vulnerabilidad. La valoración económica del daño se constituye en pérdidas esperadas debido a la distribución del daño. La integración de estos tres modelos se realiza mediante el software de OpenQuake, desarrollado por GEM,

5.1 Riesgo sísmico

Riesgo sísmico proporciona la probabilidad de que las consecuencias económicas o sociales causadas por un sismo sean iguales o excedan valores predeterminados para un área geográfica dada. Además, es la convolución de un factor de amenaza que muestra el movimiento sísmico del terreno esperado para eventos futuros, un factor de vulnerabilidad que señala cuan resistente es una estructura ante un movimiento telúrico, y un factor de exposición que indica la distribución de bienes, servicios y personas sometidos a riesgo (Muñoz, 1989). El riesgo sísmico, se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo sísmico} = (\text{Amenaza} * \text{Vulnerabilidad} * \text{Pérdidas sísmicas})$$

El riesgo aumenta cuando aumenta la amenaza, la vulnerabilidad y las pérdidas, pues son directamente proporcionales.

5.2 Riesgo sísmico de Quito

La ciudad de Quito tiene un gran potencial de riesgo sísmico, esto se evidencia en el valle interandino, en donde han ocurrido gran cantidad de sismos. El último terremoto que

afectó en gran medida a la ciudad fue en 1868. Desde esa fecha, la ciudad ha crecido y ha dado paso a construcciones de mala calidad, construidas en sitios inestables. Por esta razón, si ocurriera un sismo grande, los daños serían altos (Cárdenas & Aníbal, 2016).

5.3 Modelación de riesgo sísmico

Para analizar el riesgo del Centro Histórico de Quito se analiza un evento sísmico que afectó a esta zona. El sismo del 5 de marzo de 1987 se dio a alrededor de 70 km de la ciudad. Este afectó de manera considerable a los edificios históricos que ahora son parte del Patrimonio Cultural. Con la información y los modelos de los capítulos de exposición, amenaza y vulnerabilidad se calcula el riesgo sísmico.

5.3.1 Escenarios de terremotos

Openquake calcula estadísticas de distribución de daños o pérdidas de activos para un grupo de edificios a partir de un único escenario de ruptura sísmica. Para definirlo se necesita la información de la ruptura, es decir, del plano del evento sísmico de 1987, definido en el capítulo de amenaza. Asimismo, para definir el sitio de peligro se usa el modelo de exposición, el cual posee información de las edificaciones del CHQ. Tales como, avalúo, área de construcción, número de pisos, material de paredes y techo, definición del sistema resistente a cargas laterales, tipo de ocupación y año de construcción.

Por otro lado, para caracterizar la vulnerabilidad estructural se tienen los doce modelos definidos en el capítulo de vulnerabilidad, los cuales ayudarán a saber el porcentaje de pérdidas de los valores expuestos.

5.3.2 Condiciones del sitio

Las condiciones locales del sitio y sus efectos sobre el movimiento del terreno se incorporan de manera rutinaria en los modelos de intensidad, mediante una cantidad de

velocidad de onda de corte a 30 metros. Este valor ayuda a calcular la agitación de la intensidad, además, otros parámetros adicionales se usan para describir cuantitativamente la geología local. Estos parámetros son las profundidades a 1km/s y a 2.5km/s, los cuales son definidas por las ecuaciones GMPE.

5.3.3 Parámetros de cálculo

Los parámetros de cálculo para riesgo son los mismos que para amenaza. Los GMPE's: AkkarBommer2010, BooreAtkison2008 y ZhaoEtAl2006. El modelo de correlación es JB2009, además, el nivel de truncamiento en riesgo es de 3 desviaciones estándar de la media debido a que se necesitan muchas simulaciones y se debe considerar variabilidad. Igualmente, el número de campos de movimiento del suelo es de 2000, que es el número de convergencia que indica la estadística real.

Openquake, asigna a cada ubicación de estudio, valores del punto más cercano utilizado para especificar las condiciones de sitio. Lo mapas de riesgo se calculan para una condición de suelo correspondiente a la clase C, los cuales son perfiles de suelo denso o de roca blanda. La velocidad VS30 va entre 360 m/s a 760 m/s. Además, los valores espectrales de peligro se amplifican mediante referencias dependientes del periodo.

5.4 Mapa de pérdidas por edificio

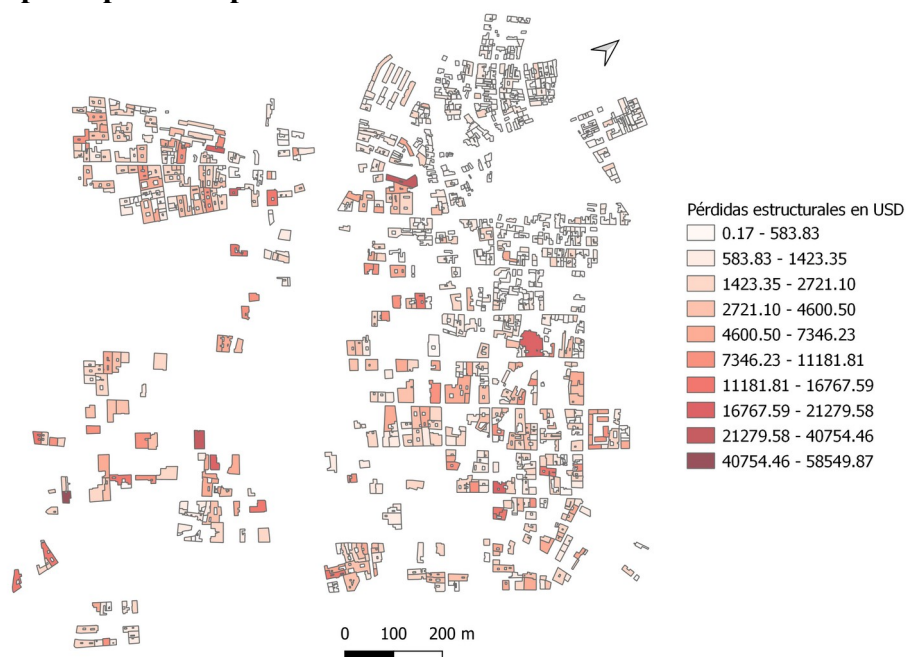


Figura 14. Pérdidas económicas en USD por edificio en el CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

En la figura 14 se observa las pérdidas económicas estructurales en USD. Se tiene un rango de pérdidas desde 0.17 a 58,549.87 USD por edificio. Las pérdidas son ligeramente diferentes para cada GMPE, como se especifica en la tabla 10.

Tabla 10: Pérdidas según GMPE para el CHQ

| AkkarBommer2010 | BooreAtkinson2008 | ZhaoEtAl2006 |
|------------------------|--------------------------|---------------------|
| 2'272,082.5 USD | 2'276,454.8 USD | 2'819,845.5 USD |

En este estudio, el GMPE que mejor se asemeja al evento de 1987 es AkkarBoomer2010, por lo explicado en el capítulo de amenaza, obteniendo 2'272,082.5 USD de pérdidas totales en la zona de estudio. Tanto AkkarBommer2010 como BooreAtkinson2008 sirven para sismos corticales, siendo así se asemejan en pérdidas.

5.4.1 Edificio con mayor pérdida

El edificio con mayor pérdida corresponde al predio número 5317 y a la taxonomía: MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO-H3



| | |
|---------------------------------|-------------------|
| Año | 2013 |
| Área Construcción | 2013 |
| Material Pared | Adobe |
| Material Techo | Teja |
| Ocupación | MIX1 |
| Ubicación | -0.22405,-78.5137 |
| Intensidad PGA suelo | 0.09g |

Figura 15. Edificio con mayor pérdida en el CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

El edificio tiene pérdidas de 58,549.87 USD, debido a que es un sistema estructural de muro y es no dúctil. Además, se aprecia que la intensidad PGA es de 0.09g, mayor a la media

del evento de 1987 que es de 0.06g. Es decir, entre mayor sea la intensidad de agitación, mayores pérdidas ocurren. Cabe recalcar que, al ver la fachada, es poco probable que haya sido construido bajo normas. Además, su material de pared es de adobe y contribuye a su vulnerabilidad sísmica.

5.5 Tipologías constructivas con mayores pérdidas

De las doce tipologías propuestas en este estudio, cinco presentan mayor cantidad de pérdidas. Entre los más afectados están: MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2 y MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3 como se observa en la figura 15.

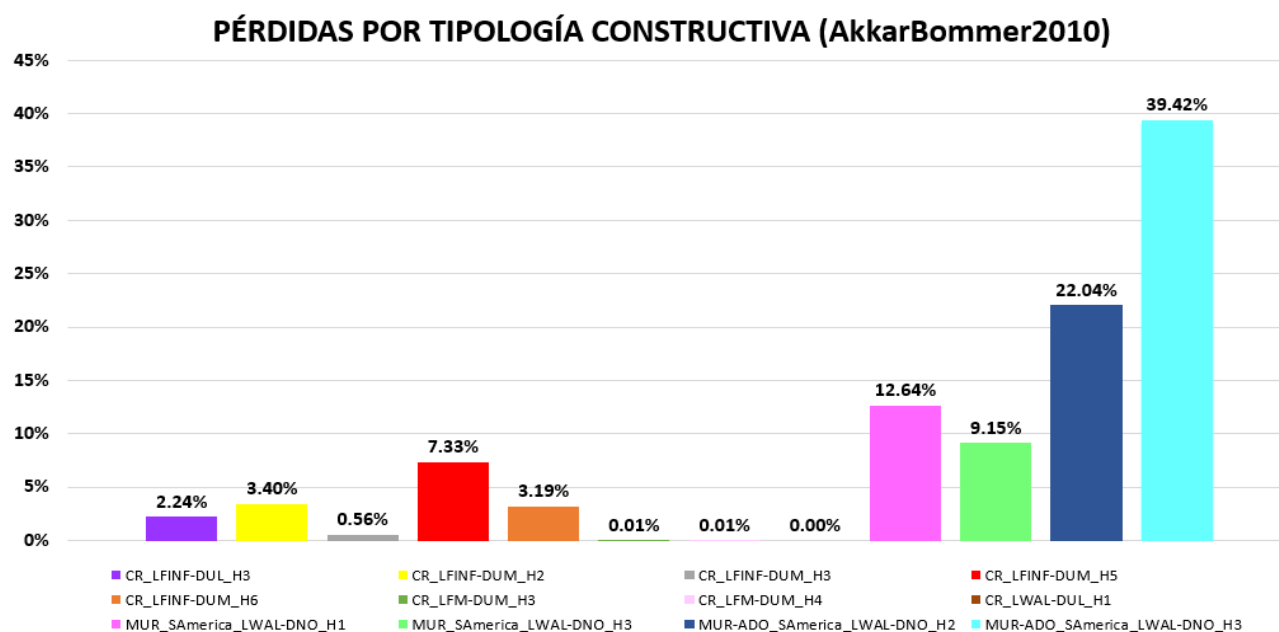


Figura 16. Pérdidas según tipología constructiva en el CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

5.5.1 Mapa de pérdidas según tipología constructiva



Figura 17. Mapa de pérdidas según tipología constructiva en el CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

Como se observa en la figura 17, cada categoría está dispersa por toda la zona de estudio. La taxonomía con mayores pérdidas son muros de 1 a 3 pisos, hechos de adobe.

Las construcciones con mayores pérdidas son:

- **MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3 y H2**

Las edificaciones que pertenecen a estas categorías son muros, es decir, albañilería no reforzada. Su respuesta dinámica depende de la estructura, en términos de rigidez, resistencia y ductilidad. Sin embargo, estos no presentan ductilidad, además, son de bloques de adobe. Este material de pared es muy antiguo y tiende a derrumbarse en eventos sísmicos. Cabe mencionar que la gran mayoría no ha sido construida con criterios ingenieriles, haciéndolos aún más vulnerable. Los edificios de 3 a 4 pisos pertenecen al 39.42%, los edificios de 1 a 2 pisos al 22.04% de pérdidas.

- **MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H1 y H3**

Las estructuras de esta categoría están hechas de ladrillo, este material ante sismos moderados, demuestran fallas de corte por agrietamiento, haciendo que las estructuras sufran fisuras y daños. Además de ser muros no dúctiles que solo resisten cargas verticales. Los edificios de 1 a 2 pisos pertenecen al 12.64% de las pérdidas totales, mientras que aquellos con 3 a 4 pisos pertenecen al 9.15%

Además de los materiales, sistemas de cargas laterales, estas estructuras se encuentran ubicadas en donde el terreno siente mayor agitación, como se observa en la figura 8. Sufren intensidades de 0.09 a 0.15g.

5.5.2 Comparación evento 1987

La noche del 5 de marzo de 1987, hubo dos sismos, el más grande de 6.9 grados en la escala de Richter. El director del Instituto Geofísico, Hugo Yepes, mencionó que la afectación fue en edificios patrimoniales del Centro Histórico, sin embargo, no hubo casas destruidas. Las cúpulas y torres de las iglesias de San Agustín, La Merced y El Belén fueron afectadas. Este evento produjo daños de alrededor de un 80% de las edificaciones, dejando las estructuras vulnerables. El riesgo de que se produzca un desastre de esta índole está latente, y el CHQ sería afectado en gran escala.

Se produjeron pequeñas fisuras en arcos de naves laterales de las iglesias, algunas presentaron agrietamiento severo en sus torres. En la iglesia San Francisco se desplomó el dintel de ventana. Algunas estructuras tuvieron deslizamiento de las tejas de cubierta. Asimismo, los edificios de concreto fueron afectados pues se produjeron daños moderados a nivel de mampostería. Después de este evento, se creó el fondo de salvamento del Patrimonio Cultural, el cual está destinado a la conservación, restauración y protección de los bienes históricos de la ciudad de Quito (Garrido, Rodríguez, & Sánchez, 2001).

Las pérdidas económicas fueron estimadas en miles de millones de dólares debido a que se produjeron daños en el oleoducto transecuatoriano (HALL, 2000). No obstante, el enfoque de este estudio se centra en estructuras residenciales y mixtas, es decir, residenciales y de uso comercial, excluyendo iglesias, lugares públicos y por ende pérdidas indirectas. Por lo que las pérdidas obtenidas en este estudio, de \$2272082.5 representan el 2.2% del avalúo total de las estructuras estudiadas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El estudio de riesgo sísmico es de gran importancia pues permite estimar pérdidas económicas y humanas que podrían ocurrir al darse un evento sísmico. Se obtuvo un modelo de exposición, la recopilación de información arrojó que el material de pared predominante con 41.17% es el ladrillo. Además, se clasificó las estructuras por su sistema estructural, siendo los muros, mampostería no reforzada, el mayor porcentaje con 68.22% de las estructuras. Es preocupante pues estos trabajan bien a compresión, pero se ven perjudicados por cargas laterales como los sismos. Asimismo, el 73.46% de las estructuras estudiadas no poseen ductilidad. Es decir, la mayoría de las estructuras no tienen una gran capacidad de deformarse más allá del rango elástico y pierden su resistencia, haciendo al CHQ una zona altamente vulnerable ante eventos sísmicos.

Por otro lado, en cuanto a amenaza, este estudio se enfoca en el evento puntual del 5 de marzo de 1987. En donde, se determinó que el GMPE de AkkarBommer2010 es el que determina los resultados de este estudio pues el evento de 1987 registró una aceleración de 0.06 g en Quito, lo mismo que se demostró con esta ecuación. Sin embargo, tanto AkkarBommer2010 y BooreAtkison2008 trabajan bien para esta zona de estudio debido a que representan sismos corticales, los cuales generalmente se dan en el CHQ.

El estudio de riesgo sísmico arrojó 2'272,082.5 USD de pérdidas estructurales. Las tipologías constructivas que presentaron un 61.46% de las pérdidas son muros de adobe y el 21.79% son muros de ladrillo. Esto se debe a que su respuesta dinámica depende de la rigidez, ductilidad y resistencia de la misma. Al reforzar las estructuras de adobe cuyo sistema son muros, las pérdidas podrían disminuir en alrededor de un 60%.

Asimismo, las diferentes tipologías estructurales no se encuentran en un solo sitio por cada clase, al contrario, se encuentran dispersas por la zona de estudio. Cabe recalcar que las edificaciones con mayor número de pérdidas se encuentran en sitios cuyo PGA, es mayor a 0.06g, es decir, mayor a la media del evento real.

Los resultados reflejan que, al producirse un sismo similar al evento de 1987, la concentración de pérdidas se observa en las zonas con edificios antiguos de adobe, ladrillo de 1 a 3 pisos y construcciones informales. Desafortunadamente, el CHQ es un sector con alto riesgo sísmico y al ocurrir un sismo importante, las pérdidas podrían llegar a los millones de dólares.

6.2 Recomendaciones

Es necesario un mejoramiento en los hábitos de construcción y, asimismo, es necesario reforzar las estructuras no dúctiles. Además, es importante realizar un estudio a mayor profundidad de las condiciones del sitio a nivel de microzonificación, para disminuir aquellas incertidumbres no comprobadas en este estudio.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agostini, M., & Gerbaudo, G. (2018). Análisis estático no-lineal para cuantificar la vulnerabilidad sísmica de edificios de hormigón armado. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 103-112.
- Aguiar, R., Bozzo, L., Barbat, A. H., & Canas, J. A. (1996). Modelos constitutivos y su efecto sobre los índices de daño sísmico de pórticos de hormigón armado. *Hormigón y acero*, (201).
- Albornoz, V. (2013). El terremoto de 1987. *El Comercio*.
- Alcocer, S. (1997). Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería: una revisión. *In Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, (Vol. 1, pp. 164-191).
- Baize, S., Audin, L., Alvarado, A., Jomard, H., Bablon, M., Champenois, J., & Le Penec, J. (2020). Active Tectonics and Earthquake Geology Along the Pallatanga Fault, Central Andes of Ecuador. *Frontiers in Earth Science*, 8, 193.
- Beauval, C., Marinière, J., Yepes, H., Audin, L., Nocquet, J., Alvarado, A., & Jomard, H. (2018). A new seismic hazard model for Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(3A), 1443-1464.
- Beauval, C., Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., Nocquet, J., Monelli, D., & Danciu, L. (2014). Probabilistic seismic-hazard assessment in Quito, estimates and uncertainties. *Seismological Research Letters*, 85(6), 1316-1327.
- Caicedo, C., Barbat, H., Canas, J., & Aguiar, R. (1994). Vulnerabilidad sísmica de edificios.
- Cañizares, F., & Singaicho, J. (2017). EQUATIONS OF ATTENUATION COMPATIBLE WITH THE QUITO FAULT SYSTEM GMPEs.
- Cárdenas, H., & Aníbal, H. (2016). *DESARROLLOS METODOLÓGICOS Y APLICACIONES HACIA EL CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN EL ECUADOR CONTINENTAL Y ESTUDIO DE RIESGO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE QUITO*. Obtenido de <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/handle/28000/2465>
- Chunga, K., Livio, F., Martillo, C., Lara-Saavedra, H., Ferrario, M., Zevallos, I., & Michetti, A. (2019). Landslides triggered by the 2016 Mw 7.8 Pedernales, Ecuador earthquake: Correlations with ESI-07 intensity, lithology, slope and PGA-h. *Geosciences*, 9(9), 371.
- Cortijo, O. L. (2008). *Metodología para el análisis de Vulnerabilidad y Riesgo ante inundaciones y Sismos, de las edificaciones en centros urbanos*. Peru: PREDES PERU.
- EPN. (2020). *Instituto Geofísico*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/>

- Escuela Politécnica Nacional; GeoHazards International; Municipio del Distrito Metropolitano de Quito; OCO Corporation. (1995). Proyecto para manejo del riesgo sísmico de Quito. *ORSTOM*.
- Falconí, R., García, E., & Villamarín, J. (2010). Falconí, R. A., García, E., & Villamarín, J. (2010). Leyes de atenuación para sismos corticales y de subducción para el Ecuador. *Revista*, Vol, 13(1), 1-18.
- Garrido, A., Rodríguez, F., & Sánchez, G. (2001). La Catedral de Quito y el terremoto de 1755. . In *ACTAS III CONGRESO INTERNACIONAL DEL BARROCO AMERICANO: Territorio, Arte, Espacio y Sociedad: Universidad Pablo de Olavide, Sevilla*, (p. 60).
- GEM. (2020). *Global Earthquake Model Foundation*. Obtenido de <https://www.globalquakemodel.org/>
- HALL, L. (2000). *Los terremotos del Ecuador del 5 de Marzo del 1987*. Quito: Estudios de Geografía.
- Hora, L. (12 de Marzo de 2010). 70% del Centro Histórico en riesgo ante un sismo. *La Hora*.
- INEC. (2010). *Censo nacional de población y vivienda 2010*.
- Lara, M. (2015). Construcciones históricas y su vulnerabilidad sísmica (El caso de Quito y sus construcciones con valor patrimonial). *CONPAT*.
- Laurendeau, A., Bonilla, L., Mercerat, D., Courboux, F., Alvarado, A., Singaicho, J., & Bertrand, E. (2017). Seismic response of the basin of Quito from continuous accelerometric records of RENAC-Quito. In *16th World Conf. on Earthquake Engineering*.
- Martins, L., & Silva, V. (2020). Development of a Fragility and Vulnerability Model for Global Seismic Risk Analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Morales, R., Yamashiro, R., Sánchez, A., Torres, R., Irala, C., & Morales, O. (1993). *Diseño Sísmico de Construcciones de Adobe*. CISMID: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.
- Muñoz, D. (1989). Conceptos básicos en riesgo sísmico. *Física de la Tierra*, 1, 199-215.
- Naya, A. (2010). *El riesgo sísmico en Quito: análisis y simulaciones*.
- Nocquet, J., Jarrin, P., Vallée, M., Mothes, P., Grandin, R., Rolandone, F., & Régnier, M. (2017). Supercycle at the Ecuadorian subduction zone revealed after the 2016 Pedernales earthquake. *Nature Geoscience*, 10(2), 145-149.
- Quito, d. (2012). *Estudio de impacto ambiental de la primera línea del Metro de Quito*. DOCUMENTO PARA SOCIABILIZACIÓN. Obtenido de http://www.metrodequito.gob.ec/estudios_de_soporte/Borrador_Estudio_de_Impacto_ambiental.
- Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007). *Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador*. Quito: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional-Corporación Editora Nacional.
- Rivas, A., & Chávez, B. (2016). Clasificación tipológica de las edificaciones en el centro histórico de Quito. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 21,2.
- Singaicho, J. (2009). *Mapa de máximas intensidades sísmicas del Ecuador. Criterios estructurales para mejorar la estimación de intensidades*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Tavárez, J. (2016). Análisis Estático y Dinámico Incremental de una estructura de muros de hormigón armado en la República Dominicana. Barcelona: Escola de Camins: Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Yépez, F. (2001). Últimos avances en la evaluación del riesgo sísmico de Quito y futuros proyectos de mitigación. Memorias del seminario “Gestión de riesgos y prevención de desastres”. *FLACSO, COOPI*, 16-28.

8. ANEXOS

9.1. ANEXO A: AMENAZA

9.1.1 Archivo NRML de Earthquake Rupture

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
- <nrml xmlns="http://openquake.org/xmlns/nrml/0.4" xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml">
  - <singlePlaneRupture>
    <magnitude>6.9</magnitude>
    <rake>159.05</rake>
    <hypocenter depth="12" lon="-77.84" lat="-0.087"/>
    - <planarSurface dip="47.05" strike="261.1">
      <topLeft depth="7.36072" lon="-77.60720" lat="-0.08986"/>
      <topRight depth="7.36072" lon="-78.06078" lat="-0.16088"/>
      <bottomLeft depth="16.63928" lon="-77.61922" lat="-0.01311"/>
      <bottomRight depth="16.63928" lon="-78.07280" lat="-0.08414"/>
    </planarSurface>
  </singlePlaneRupture>
</nrml>

```

9.1.2 Archivo NRML de GMPE

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
- <nrml xmlns="http://openquake.org/xmlns/nrml/0.5"
  xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml">
  - <logicTree logicTreeID="lt1">
    - <logicTreeBranchingLevel branchingLevelID="bl1">
      - <logicTreeBranchSet applyToTectonicRegionType="Active
        Shallow Crust" branchSetID="bs1"
        uncertaintyType="gmpeModel">
        - <logicTreeBranch branchID="b0">
          <uncertaintyModel>AkkarBommer2010</uncertaintyModel>
          <uncertaintyWeight>0.333</uncertaintyWeight>
        </logicTreeBranch>
        - <logicTreeBranch branchID="b1">
          <uncertaintyModel>BooreAtkinson2008</uncertaintyModel>
          <uncertaintyWeight>0.333</uncertaintyWeight>
        </logicTreeBranch>
        - <logicTreeBranch branchID="b2">
          <uncertaintyModel>ZhaoEtAl2006Asc</uncertaintyModel>
          <uncertaintyWeight>0.334</uncertaintyWeight>
        </logicTreeBranch>
      </logicTreeBranchSet>
    </logicTreeBranchingLevel>
  </logicTree>
</nrml>

```

9.1.3 Archivo job.ini para el CHQ con variabilidad

```

# Generated automatically with IPT at Tue, 03 Nov 2020 18:51:33 -0000
[general]
description = PLANO A 1987 VARIABLE
calculation_mode = scenario
random_seed = 113

[Rupture information]
rupture_model_file = 1987 plano a.xml
rupture_mesh_spacing = 3.0

[Hazard sites]
region_grid_spacing = 0.015
region = -78.52034 -0.21930, -78.51634 -0.21485, -78.51684 -0.21298, -78.51389 -0.21007,
-78.50630 -0.21526, -78.50432 -0.21672, -78.51043 -0.22504, -78.51288 -0.22646

[Site conditions]
reference_vs30_value = 760
reference_vs30_type = inferred
reference_depth_to_2pt5km_per_sec = 2.0
reference_depth_to_1pt0km_per_sec = 100.0

[Calculation parameters]
gsim_logic_tree_file = gmpe.xml
intensity_measure_types = PGA, SA(1.0)
ground_motion_correlation_model = JB2009
ground_motion_correlation_params = {"vs30_clustering": False}
truncation_level = 3.0
maximum_distance = 300
number_of_ground_motion_fields = 250

```

9.1.4 Archivo *job.ini* para el CHQ sin variabilidad

```
# Generated automatically with IPT at Tue, 03 Nov 2020 19:00:35 -0000
[general]
description = PLANO A 1987 sin variabilidad
calculation_mode = scenario
random_seed = 113

[Rupture information]
rupture_model_file = 1987 plano a.xml
rupture_mesh_spacing = 2.0

[Hazard sites]
region_grid_spacing = 0.01
region = -78.52034 -0.21930, -78.51634 -0.21485, -78.51684 -0.21298, -78.51389 -0.21007,
-78.50630 -0.21526, -78.50432 -0.21672, -78.51043 -0.22504, -78.51288 -0.22646

[Site conditions]
reference_vs30_value = 760
reference_vs30_type = inferred
reference_depth_to_2pt5km_per_sec = 2.0
reference_depth_to_1pt0km_per_sec = 100.0

[Calculation parameters]
gsim_logic_tree_file = gmpe.xml
intensity_measure_types = PGA, SA(1.0)
ground_motion_correlation_model =
truncation_level = 0
maximum_distance = 300
number_of_ground_motion_fields = 1
```

9.1.3 Archivo *job.ini* para Quito y el epicentro

```
# Generated automatically with IPT at Tue, 03 Nov 2020 19:00:35 -0000
[general]
description = PLANO A 1987 sin variabilidad QUITO
calculation_mode = scenario
random_seed = 113

[Rupture information]
rupture_model_file = 1987 plano a.xml
rupture_mesh_spacing = 2.0

[Hazard sites]
region_grid_spacing = 0.25
region = -78.586 -0.0147, -77.758 -0.0147, -77.758 -0.352, -78.586 -0.352

[Site conditions]
reference_vs30_value = 760
reference_vs30_type = inferred
reference_depth_to_2pt5km_per_sec = 2.0
reference_depth_to_1pt0km_per_sec = 100.0

[Calculation parameters]
gsim_logic_tree_file = gmpe.xml
intensity_measure_types = PGA, SA(1.0)
ground_motion_correlation_model =
truncation_level = 0
maximum_distance = 300
number_of_ground_motion_fields = 1
```


9.1.4 Distribución de PGA [g] con variabilidad para GMPE's

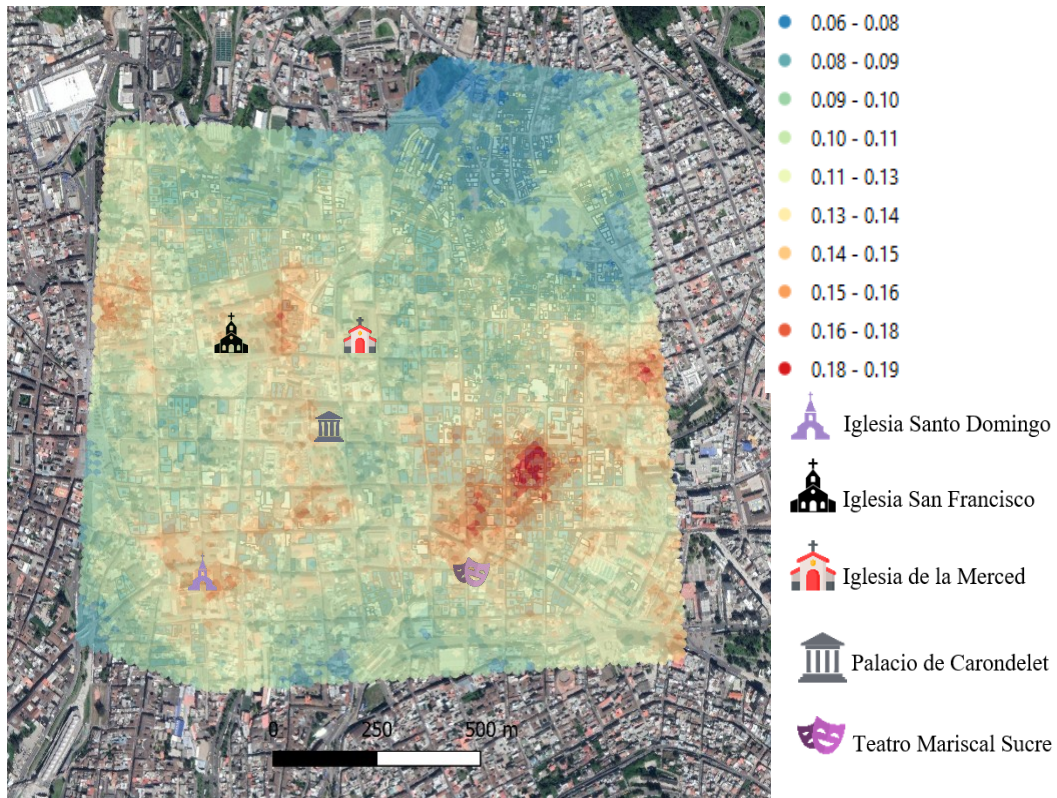


Figura 1. Distribución de PGA [g] con variabilidad con BooreAtkinson2008 en el CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

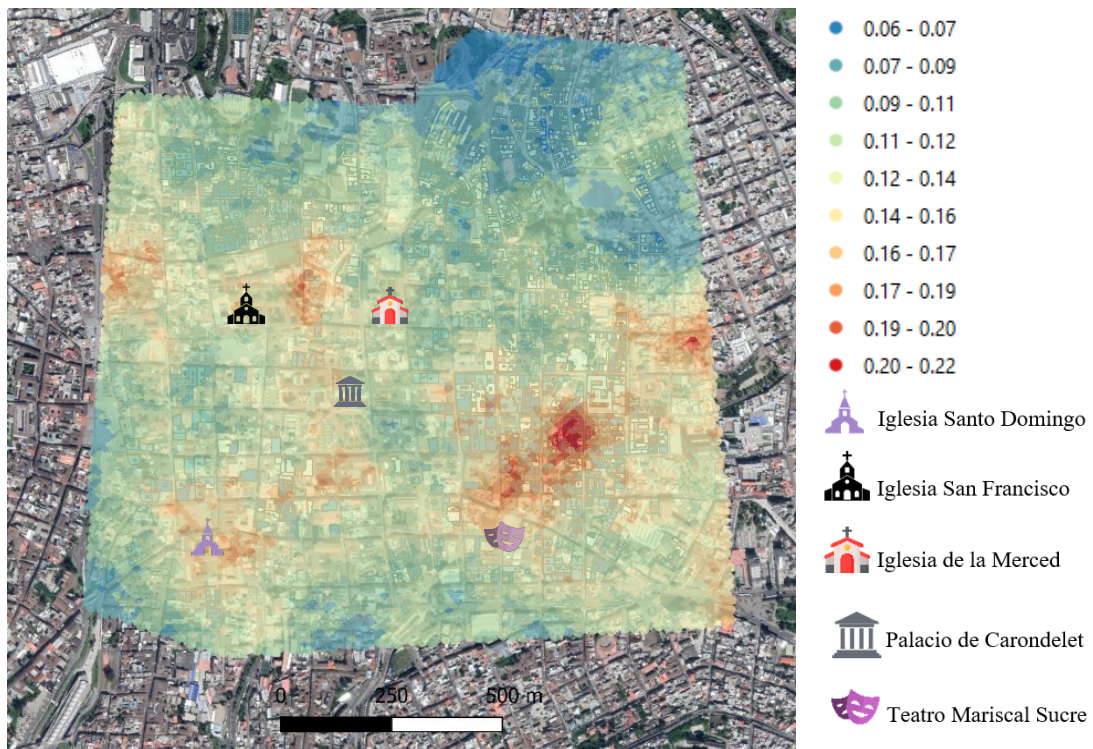


Figura 2. Distribución de PGA [g] con variabilidad con ZhaoEtAl2006 en el CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

9.1.5 Distribución de PGA sin variabilidad para GMPEs

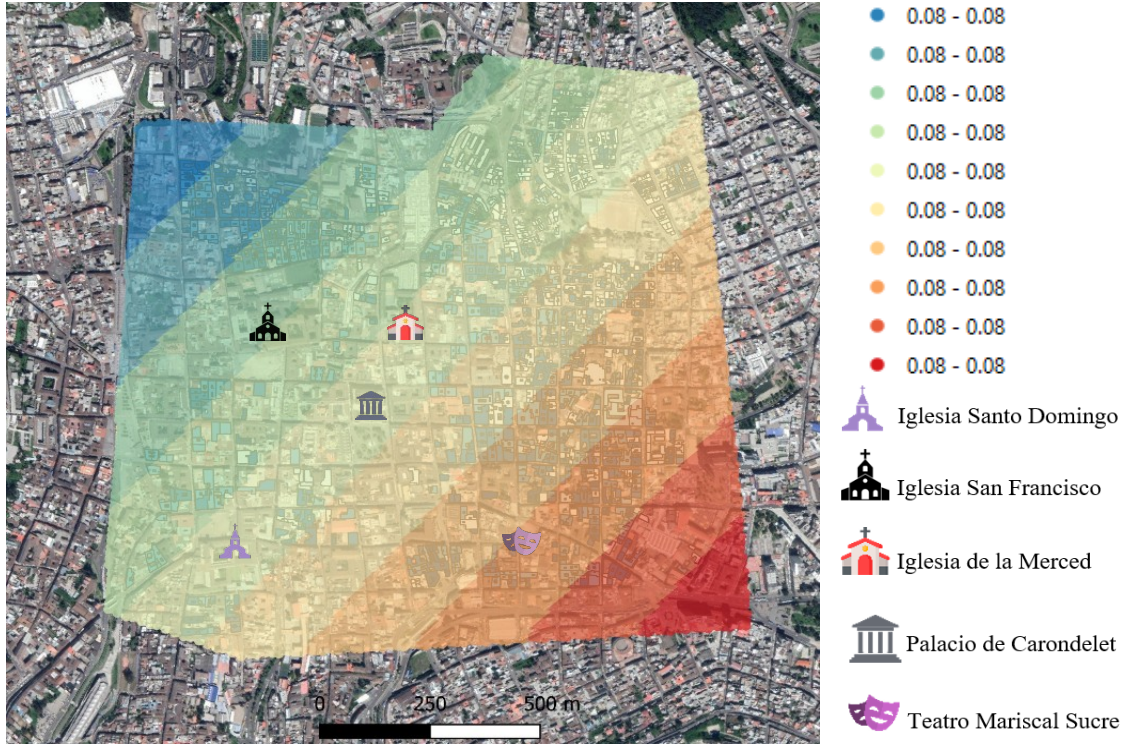


Figura 3. Distribución de PGA[g] sin variabilidad con BooreAtkinson2008 en el CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

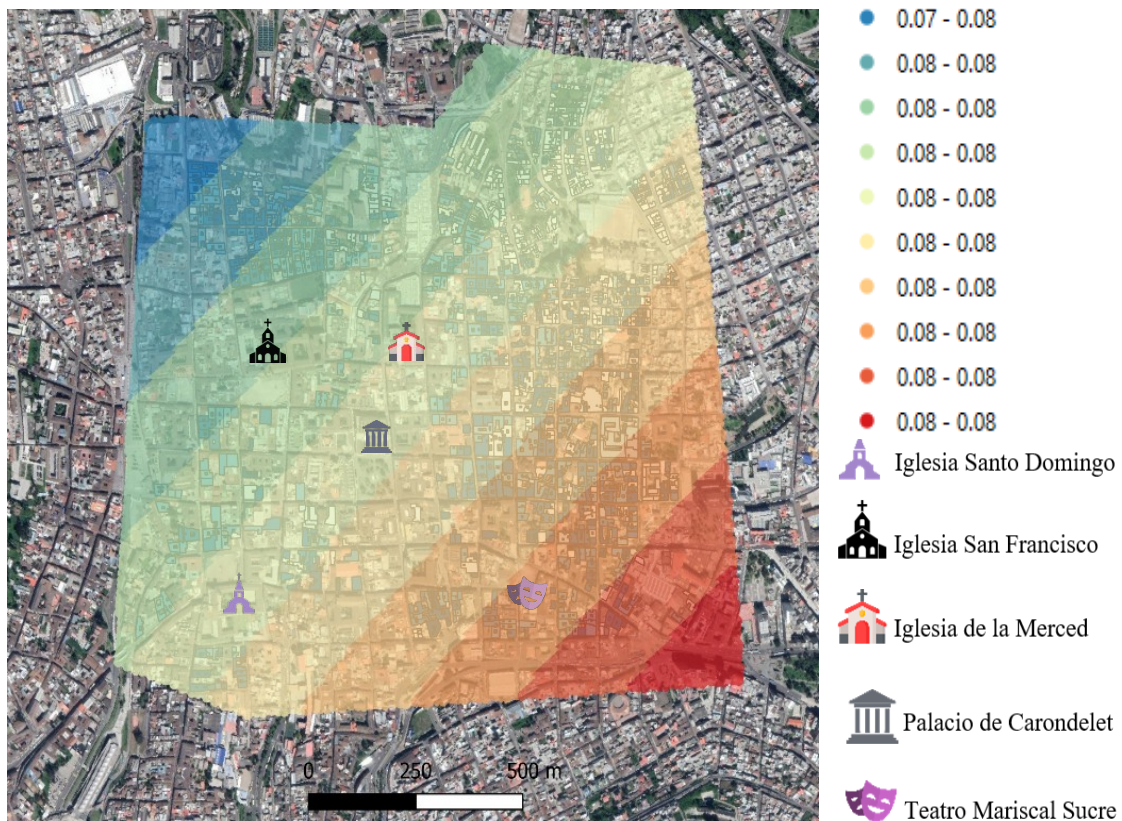


Figura 4. Distribución de PGA[g] sin variabilidad con ZhaoEtAl2006 en el CHQ

Elaborado por Indyra Delgado

9.1.5 Distribución de PGA para Quito y epicentro 1987

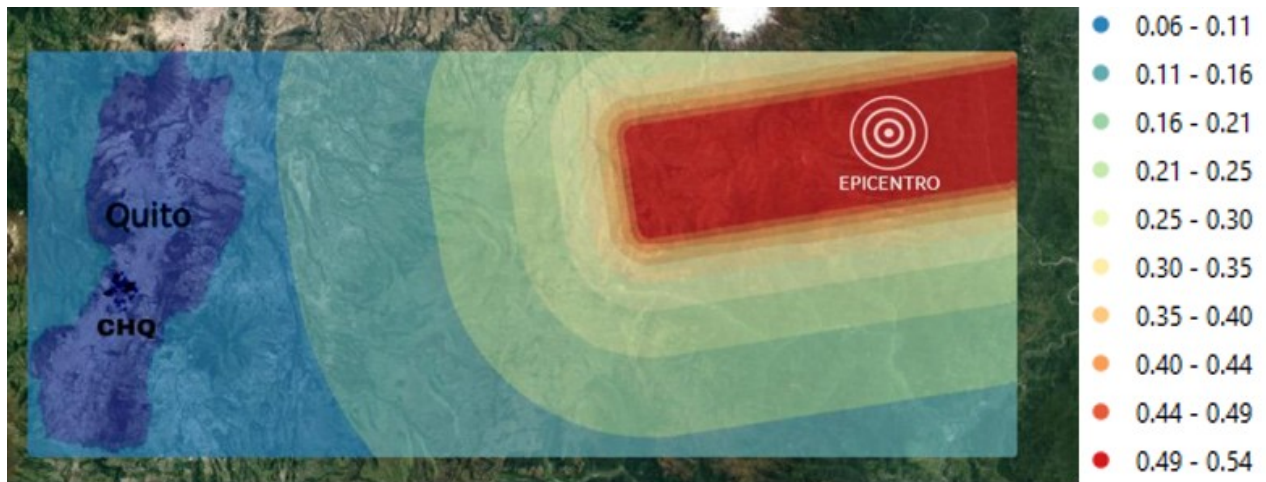


Figura 5. Distribución de PGA [g] con BooreAtkinson2008 en Quito y epicentro 1987

Elaborado por Indyra Delgado

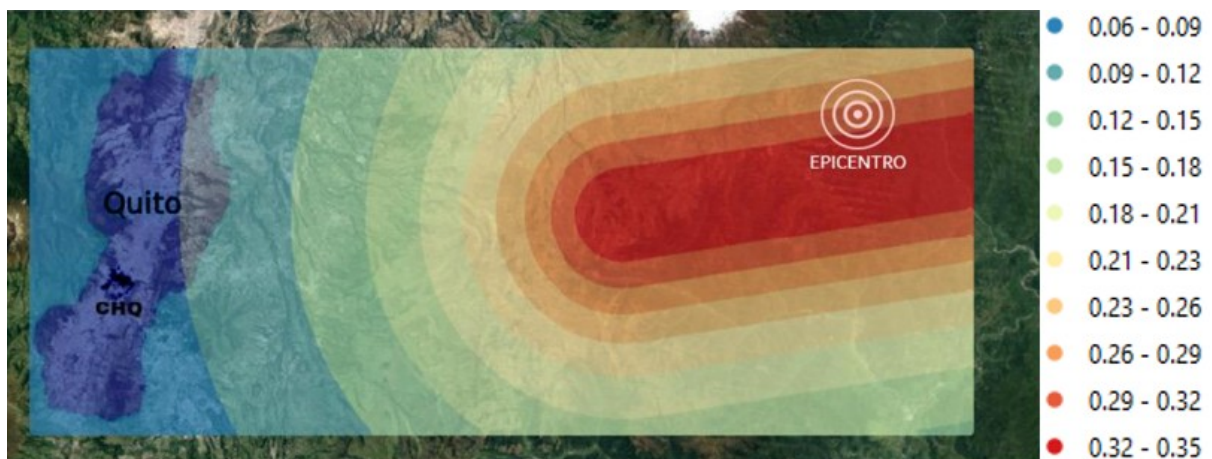


Figura 6. Distribución de PGA [g] con ZhaoEtAl2006 en Quito y epicentro 1987

Elaborado por Indyra Delgado

9.1.6 Archivo *job_hazard.ini* para PSHA

```
[erf]
rupture_mesh_spacing = 3.0
width_of_mfd_bin = 0.2
area_source_discretization = 10
complex_fault_mesh_spacing = 10

[site_params]
# The remaining parameters are set for the active shallow crust GMPES
# consistently to what done by the USGS.
reference_vs30_value = 585.0
reference_vs30_type = inferred
reference_depth_to_2pt5km_per_sec = 5.0
reference_depth_to_1pt0km_per_sec = 100.0

[calculation]
source_model_logic_tree_file = source_model_logic_tree.xml
gsim_logic_tree_file = gmpe_logic_tree.xml
# years
investigation_time = 475

intensity_measure_types_and_levels = {"PGA": logscale(0.005, 3.00, 20)}

# truncation occurs at 3 sigma,
truncation_level = 3
maximum_distance = {   'Subduction Interface': 300.,
                        'Subduction IntraSlab': 300.,
                        'Active Shallow Crust': 150.,
                        'Stable Shallow Crust':200.,
                        'default': 150.}

[output]

export_dir = /tmp
mean_hazard_curves = True
quantile_hazard_curves = 0.15, 0.50, 0.85
hazard_maps = True
individual_curves = True
uniform_hazard_spectra = True
#poes = 0.020 0.05 0.1 0.20 0.5
poes = 0.002105
```

9.2.1 Curva de vulnerabilidad CR_LFINF-DUL_H3

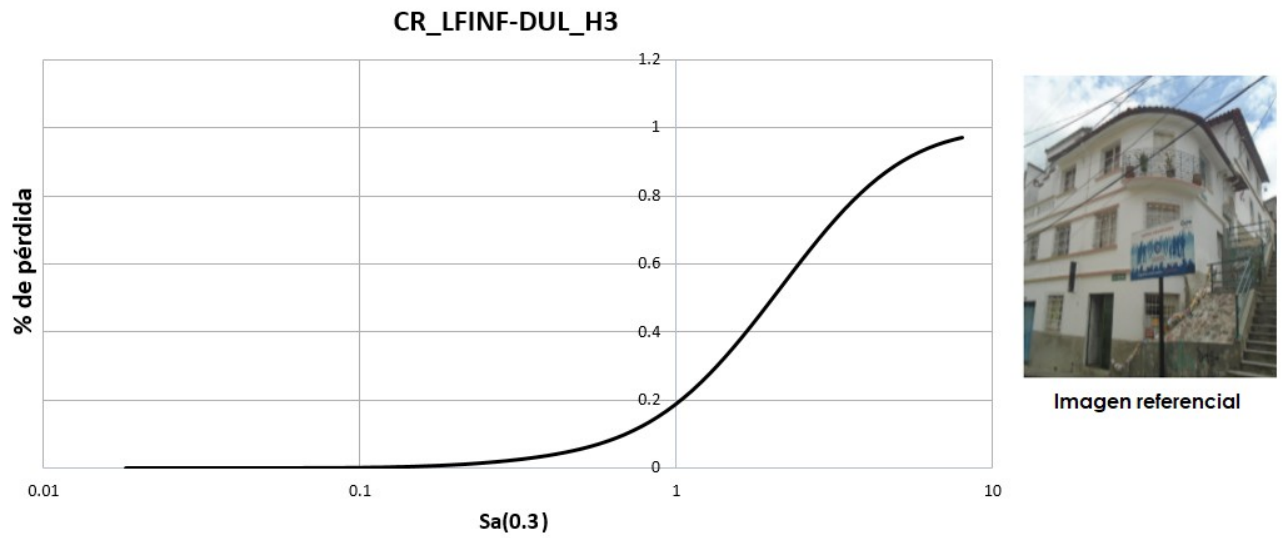


Figura 7. Curva vulnerabilidad CR_LFINF-DUL_H3 (Martins & Silva , 2020)

9.2.2 Curva de vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H2

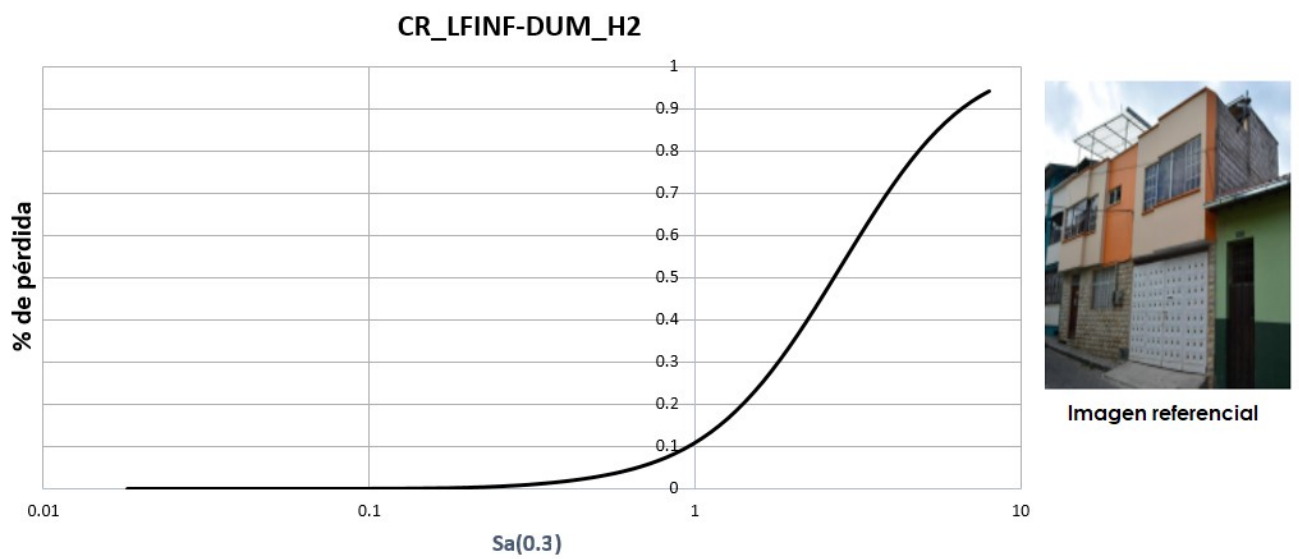


Figura 8. Curva vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H2 (Martins & Silva , 2020)

9.2.3 Curva de vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H5

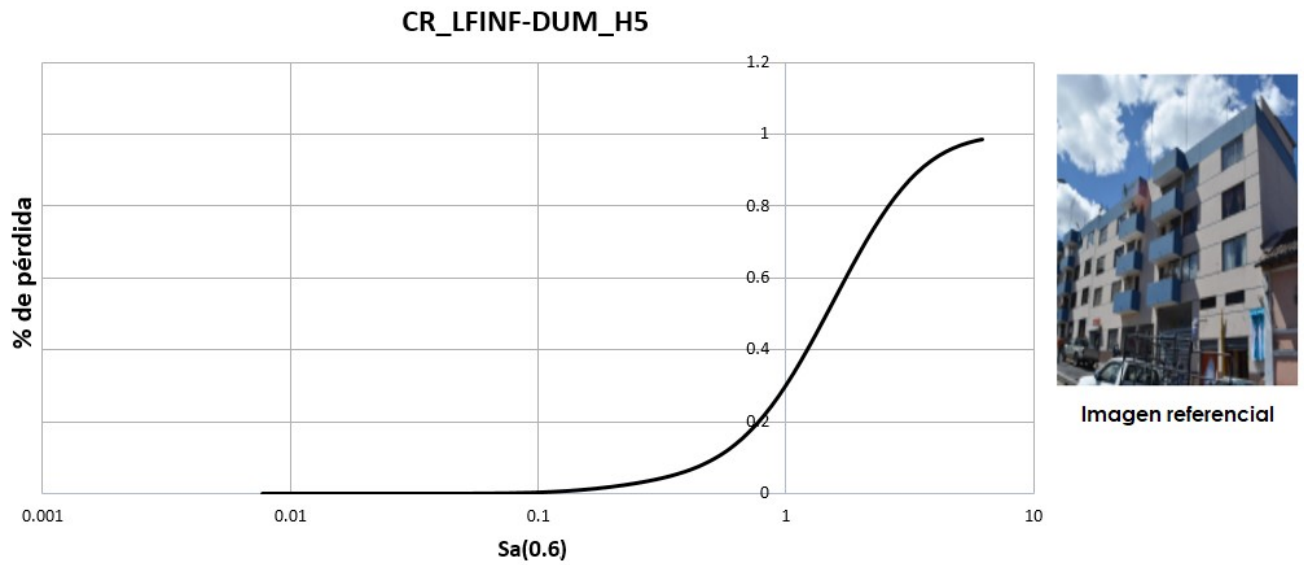


Figura 9. Curva vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H5 (Martins & Silva , 2020)

9.2.4 Curva de vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H6

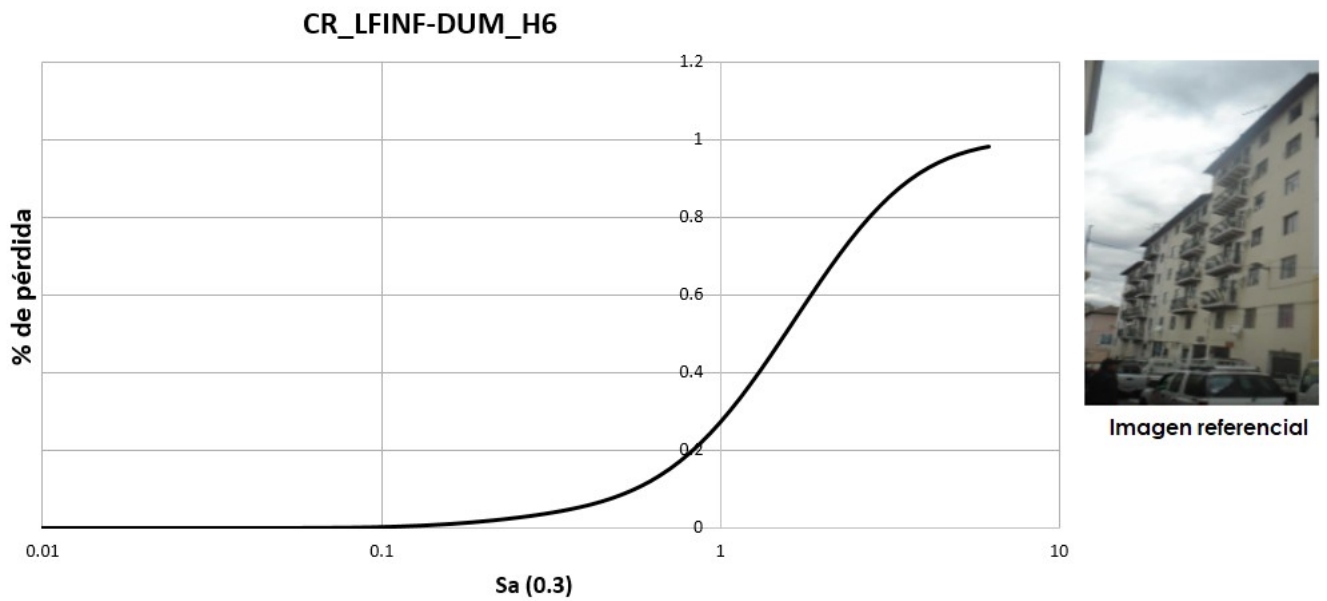


Figura 10. Curva vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H6 (Martins & Silva , 2020)

9.2.5 Curva de vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H3

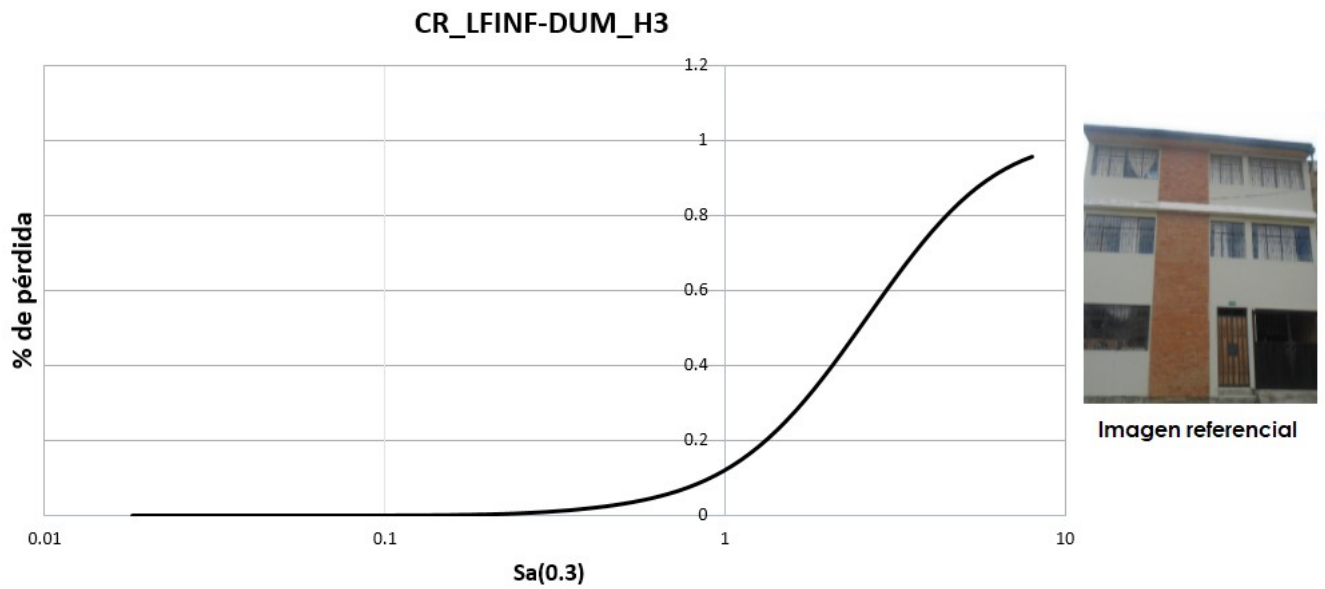


Figura 11. Curva vulnerabilidad CR_LFINF-DUM_H3 (Martins & Silva , 2020)

9.2.6 Curva de vulnerabilidad CR_LWAL-DUL_H1

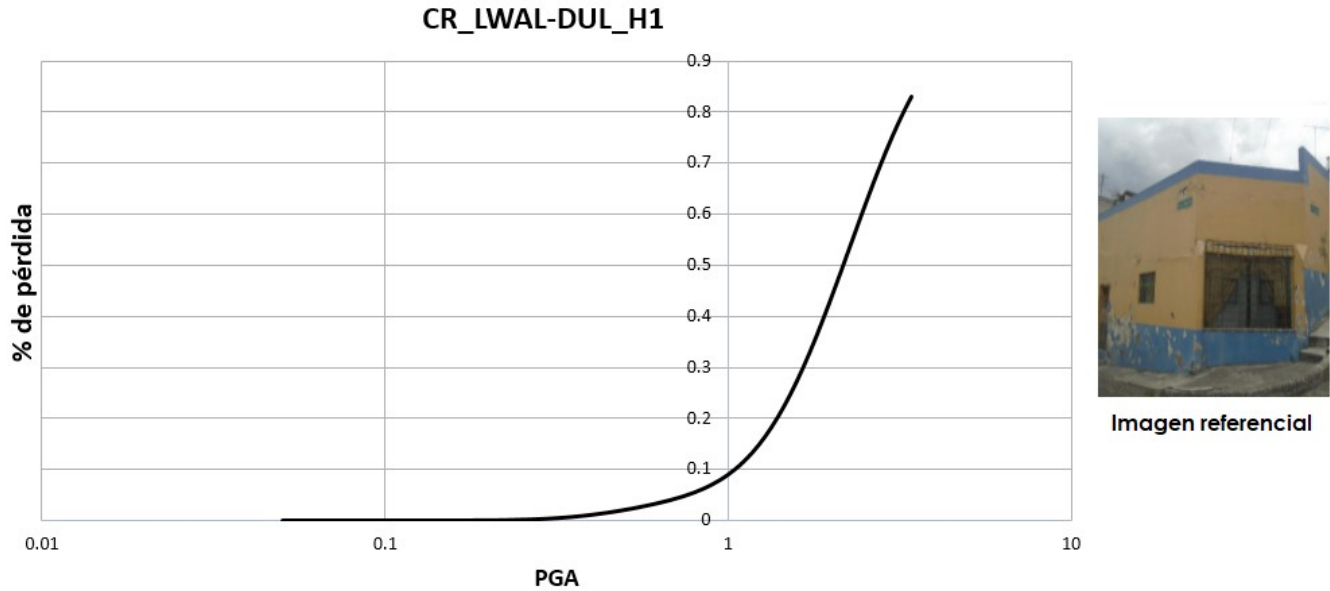


Figura 12. Curva vulnerabilidad CR_LWAL-DUL_H1 (Martins & Silva , 2020)

9.2.7 Curva de vulnerabilidad CR_LFM-DUM_H4

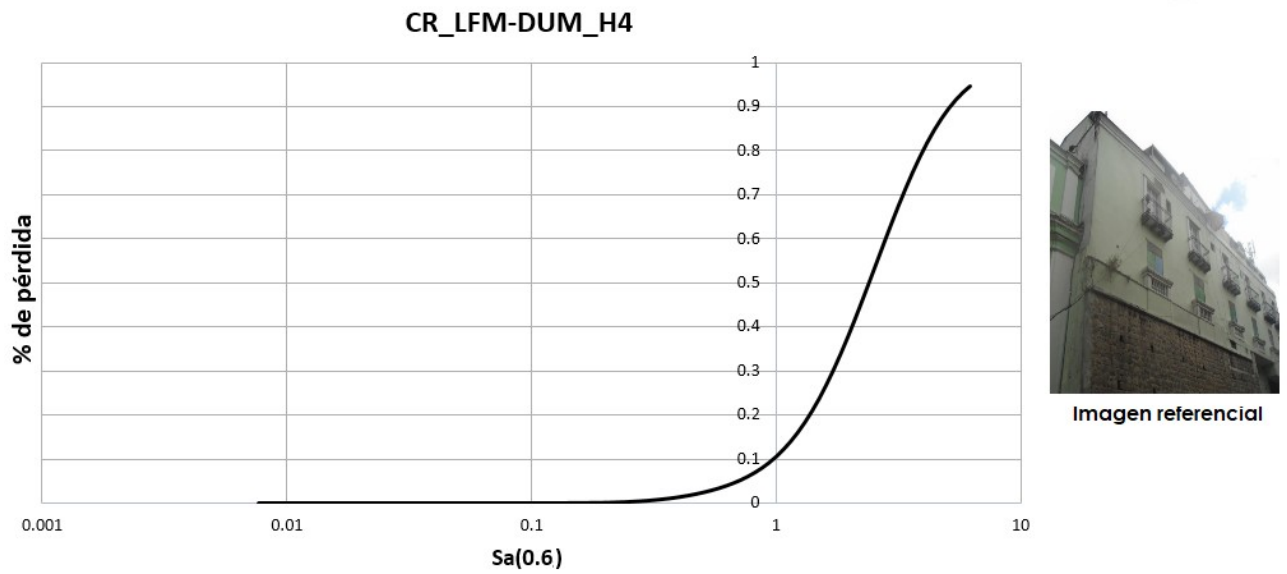


Figura 13. Curva vulnerabilidad CR_LFM-DUM_H4 (Martins & Silva , 2020)

9.2.8 Curva de vulnerabilidad CR_LFM-DUM_H3

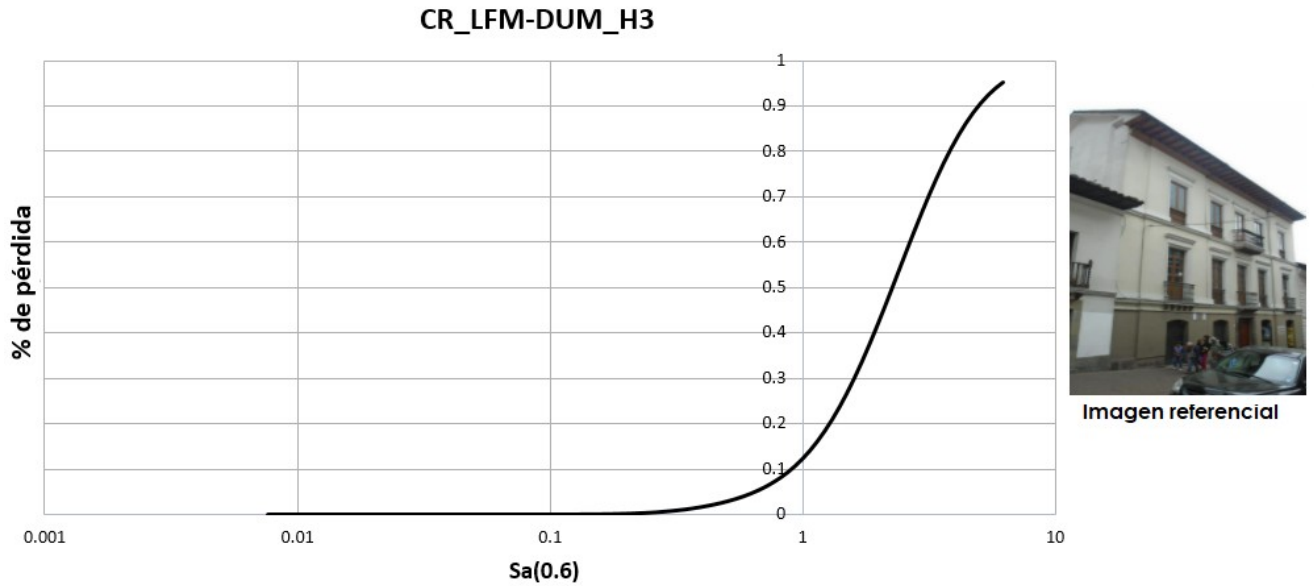


Figura 14. Curva vulnerabilidad CR_LFM-DUM_H3 (Martins & Silva , 2020)

9.2.9 Curva de vulnerabilidad MUR-ADO_Samerica_LWAL-DNO_H2

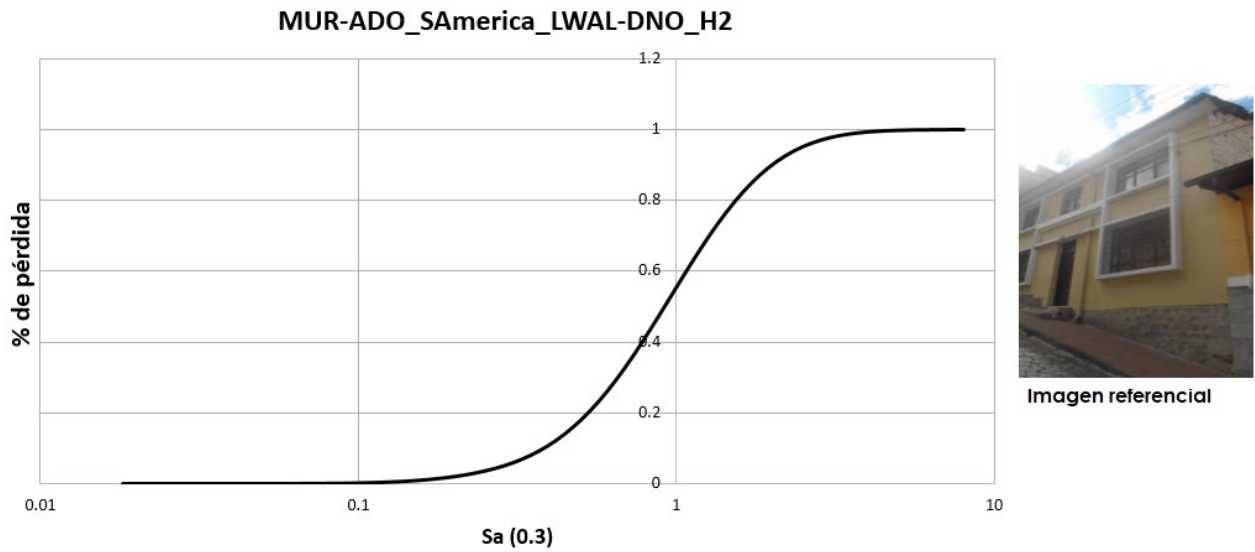


Figura 15. Curva vulnerabilidad MUR-ADO_Samerica_LWAL-DNO_H2 (Martins & Silva , 2020)

9.2.10 Curva de vulnerabilidad MUR-ADO_Samerica_LWAL-DNO_H3

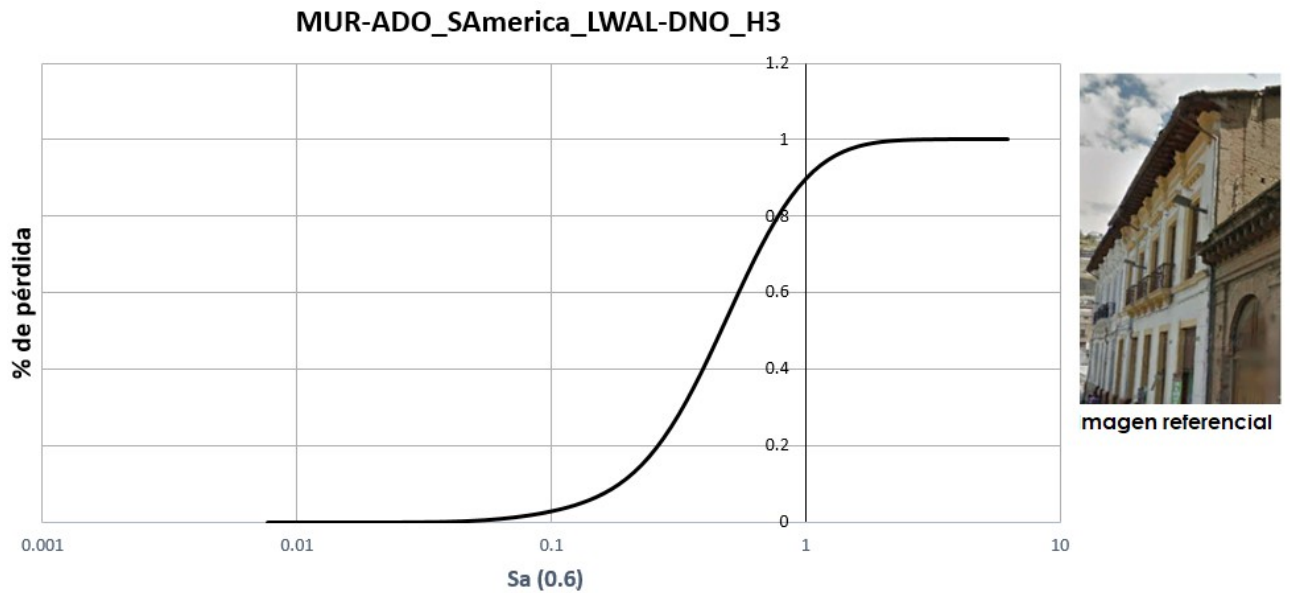


Figura 16. Curva vulnerabilidad MUR-ADO_Samerica_LWAL-DNO_H3 (Martins & Silva , 2020)

9.2.11 Curva de vulnerabilidad MUR_Samerica_LWAL-DNO_H3

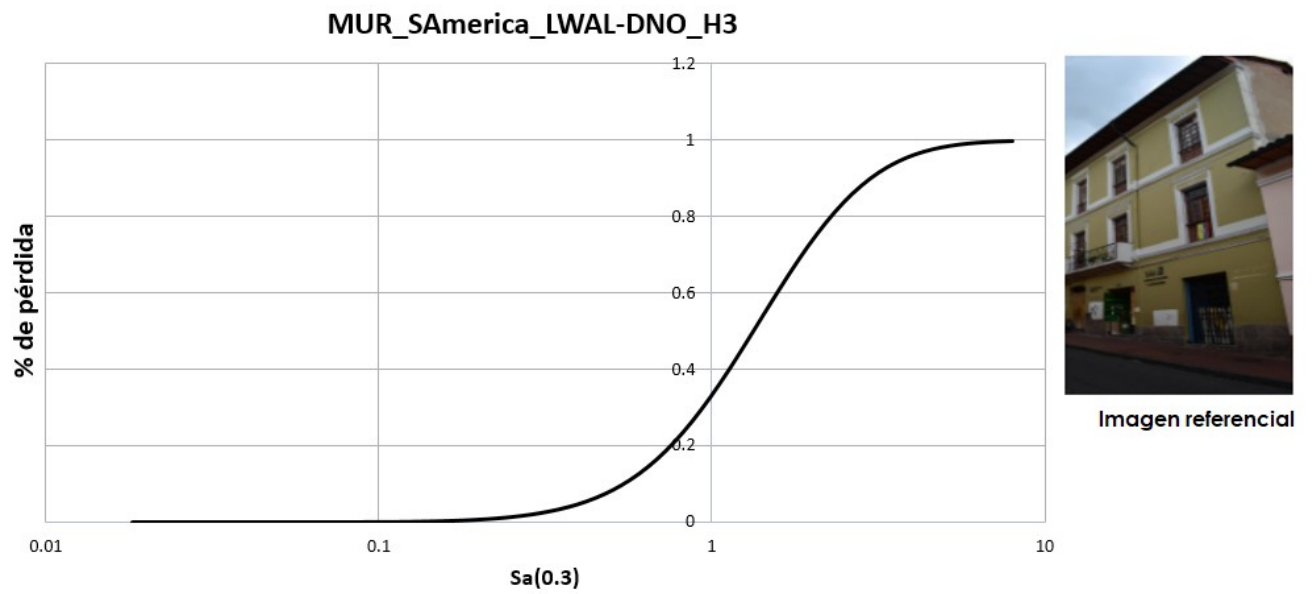


Figura 17. Curva vulnerabilidad MUR_Samerica_LWAL-DNO_H3 (Martins & Silva , 2020)

9.3. ANEXO C: RIESGO

9.3.1 Archivo XML de exposición CHQ

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
- <nrml xmlns="http://openquake.org/xmlns/nrml/0.4">
  - <exposureModel taxonomySource="GEM taxonomy" category="buildings" id="ex1">
    <description>exposi</description>
    - <conversions>
      - <costTypes>
        <costType unit="USD" type="aggregated" name="structural"/>
      </costTypes>
    </conversions>
    <tagNames>area_pol predio pisos m_techo m_paredes llrs duc ocu ano_cons area_cons frente tax</tagNames>
  - <assets>
    - <asset id="10" taxonomy="CR+CIP/LFINF+DUC+RMT6:2-3" number="1">
      <location lat="-0.215237183" lon="-78.50812275"/>
      - <costs>
        <cost type="structural" value="46379.15"/>
      </costs>
      <tags tax="CR_LFINF-DUM_H2" frente="11.42" area_cons="413.72" ano_cons="1960" ocu="RES1" duc="DUC" llrs="PORTICO" m_paredes="Mbloque" m_techo="Zinc o Asbesto" pisos="2" predio="10683" area_pol="164.65"/>
    </asset>
    - <asset id="11" taxonomy="CR+CIP/LFINF+DUC+RMT6:2-3" number="1">
      <location lat="-0.215277794" lon="-78.50798404"/>
      - <costs>
        <cost type="structural" value="21512"/>
      </costs>
      <tags tax="CR_LFINF-DUM_H2" frente="17.28" area_cons="245.59" ano_cons="1960" ocu="RES1" duc="DUC" llrs="PORTICO" m_paredes="Mbloque" m_techo="Zinc o Asbesto" pisos="2" predio="46727" area_pol="127.49"/>
    </asset>
    - <asset id="12" taxonomy="CR+CIP/LFINF+DUC+RMT6:2-3" number="1">
      <location lat="-0.215377939" lon="-78.50795074"/>
      - <costs>
        <cost type="structural" value="30243.7"/>
      </costs>
    </asset>
  </assets>
</nrml>
```

9.3.2 Archivo XML de plano de ruptura 1987

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
- <nrml xmlns="http://openquake.org/xmlns/nrml/0.4" xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml">
  - <singlePlaneRupture>
    <magnitude>6.9</magnitude>
    <rake>159.05</rake>
    <hypocenter depth="12" lon="-77.84" lat="-0.087"/>
    - <planarSurface dip="47.05" strike="261.1">
      <topLeft depth="7.36072" lon="-77.60720" lat="-0.08986"/>
      <topRight depth="7.36072" lon="-78.06078" lat="-0.16088"/>
      <bottomLeft depth="16.63928" lon="-77.61922" lat="-0.01311"/>
      <bottomRight depth="16.63928" lon="-78.07280" lat="-0.08414"/>
    </planarSurface>
  </singlePlaneRupture>
</nrml>
```


9.3.5 Equivalencia entre taxonomía de modelo de exposición con curvas de vulnerabilidad

| Taxonomía Exposición | Conversiones curvas de vulnerabilidad |
|-----------------------------|--|
| CR+CIP/LFINF+DNO+RMN:2-4 | CR_LFINF-DUL_H3 |
| CR+CIP/LFINF+DNO+RMT1:2-4 | CR_LFINF-DUL_H3 |
| CR+CIP/LFINF+DNO+RMT6:2-3 | CR_LFINF-DUL_H3 |
| CR+CIP/LFINF+DUC+RMN:1-3 | CR_LFINF-DUM_H2 |
| CR+CIP/LFINF+DUC+RMN:4-7 | CR_LFINF-DUM_H6 |
| CR+CIP/LFINF+DUC+RMT1:1-3 | CR_LFINF-DUM_H2 |
| CR+CIP/LFINF+DUC+RMT1:4-6 | CR_LFINF-DUM_H5 |
| CR+CIP/LFINF+DUC+RMT6:2-3 | CR_LFINF-DUM_H3 |
| CR+CIP/LFINF+DUC+RMT6:4-6 | CR_LFINF-DUM_H5 |
| CR+CIP/LFLSINF+DUC+RMN:3-5 | CR_LFINF-DUM_H5 |
| CR+CIP/LFLSINF+DUC+RMT1:4-5 | CR_LFINF-DUM_H5 |
| CR+CIP/LWAL+DNO+RMT1:1 | CR_LWAL-DUL_H1 |
| CR+CIP/LWAL+DNO+RMT6:1 | CR_LWAL-DUL_H1 |
| CR+CIP/LWAL+DUC+RMN:4 | CR_LFM-DUM_H4 |
| CR+CIP/LWAL+DUC+RMT1:3 | CR_LFM-DUM_H3 |
| MUR+ADO/LWAL+DNO+RMN:1-2 | MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2 |
| MUR+ADO/LWAL+DNO+RMN:4-5 | MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3 |
| MUR+ADO/LWAL+DNO+RMT1:1-2 | MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2 |
| MUR+ADO/LWAL+DNO+RMT1:3-4 | MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3 |
| MUR+ADO/LWAL+DNO+RMT6:1-2 | MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2 |
| MUR+ADO/LWAL+DNO+RMT6:3-4 | MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3 |
| MUR+CLBRS/LWAL+DNO+RMN:1-2 | MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H1 |
| MUR+CLBRS/LWAL+DNO+RMN:3-4 | MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3 |
| MUR+CLBRS/LWAL+DNO+RMT1:1-2 | MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H1 |
| MUR+CLBRS/LWAL+DNO+RMT1:3-4 | MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3 |
| MUR+CLBRS/LWAL+DNO+RMT6:1-2 | MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H1 |
| MUR+CLBRS/LWAL+DNO+RMT6:3-4 | MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3 |

9.3.6 Archivo *job.ini* de riesgo

```
# Generated automatically with IPT at Tue, 03 Nov 2020 19:00:35 -0000
[general]
description = PLANO A 1987 sin variabilidad
calculation_mode = scenario_risk
random_seed = 113

[exposure]
taxonomy_mapping_csv = ch_taxonomy_mapping.csv
exposure_file = exposure_quito_ch_v1.0.xml

[Rupture information]
rupture_model_file = 1987 plano a.xml
rupture_mesh_spacing = 0.5

[site_params]
site_model_file = Quito_CH_site_conditions.csv

[vulnerability]
structural_vulnerability_file = Quito_CH_vulnerability_v1.0.xml

[Calculation parameters]
gsim_logic_tree_file = gmpe.xml
ground_motion_correlation_model = JB2009
ground_motion_correlation_params = {"vs30_clustering": False}
truncation_level = 3.0
maximum_distance = 300.0
number_of_ground_motion_fields = 2000
```