

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Estudio de Riesgo Sísmico utilizando métodos estocásticos para el
Centro Histórico de Quito usando OpenQuake**

Jadira Liseth Llugsha Toapanta

Ingeniería Civil

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

Quito, 08 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 de Riesgo Sísmico utilizando métodos estocásticos para el Centro
Histórico de Quito usando OpenQuake**

Jadira Liseth Llugsha Toapanta

Nombre del profesor, Título académico Juan Carlos Pantoja, MSc. Ingeniero Civil

Quito, 08 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: Jadira Liseth Llugsha Toapanta

Código: 00124083

Cédula de identidad: 1722591433

Lugar y fecha: Quito, 08 de 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 in <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UNPUBLISHED DOCUMENT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

El presente trabajo de titulación lo dedico a mi familia, quienes han estado conmigo en cada meta que me he propuesto. A mi madre, que sin importar su cansancio me ha brindado su apoyo y amor incondicional, ella me inspira siempre para nunca rendirme y demostrarle cuan orgullosa estoy de ella. A mi padre, por su apoyo día a día y sus consejos que me han servido para seguir adelante a pesar de cualquier tropiezo. A mi hermano quien ha sido un pilar de inspiración constante por ser como un segundo padre para mí. Y a mis hermosos sobrinos, Mateo y Emiliano, junto con su compañía y travesuras desde el cielo y aquí en la tierra me han impulsado a ser mejor cada día.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Dioselina y Angel, por cultivar en mí, aquellos valores que me han ayudado a ser la persona que soy ahora, por enseñarme la importancia del estudio como la mejor herencia que me han podido dar.

A mi hermano, Roberto junto con sus hijos, con cada alegría y compañía han sido parte de mi crecimiento y de la culminación de esta meta.

A mi familia materna y paterna, que han estado brindándome su cariño y ánimos para no desistir.

A mis amigos y amigas, por aquellos buenos y malos momentos que hemos vivido.

A mis profesores y a la universidad por cada una de sus enseñanzas y conocimientos otorgados, y por ser una guía constante.

A la Mtra. Anabel Soriano Orozco quien fue mi guía durante todo este proceso de aprendizaje y reflexión.

Un agradecimiento cordial al Dr. Alejandro José Calderón Carpio miembro de la asociación Global Earthquake Model.

Y un especial agradecimiento al Ing. Juan Carlos Pantoja Moyano, quien fue mi tutor del presente proyecto de titulación, por los conocimientos brindados durante la carrera y realización de este documento.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se realiza un estudio preliminar de riesgo sísmico de la ciudad de Quito utilizando eventos estocásticos para un periodo de retorno de 475 años con una probabilidad de excedencia del 10% según lo establecido en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC2015), se aplica la metodología de la fundación Global Earthquake Model (GEM) con la ayuda del software de código abierto OpenQuake.

Se desarrolla el modelo de exposición en colaboración con estudiantes de ingeniería civil de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, este estudio está concentrado principalmente en estructuras de uso residencial del Centro Histórico de Quito, caracterizado con las funciones de fragilidad y vulnerabilidad de la investigación realizada por Martins y Silva (2020); el modelo de amenaza sísmica se obtiene del proyecto South America Risk Assessment (SARA) desarrollado entre 2013 y 2015 por el GEM; y el cálculo del riesgo sísmico donde se determina las pérdidas económicas anuales se hace utilizando el software OpenQuake a partir de los eventos estocásticos calculados en el modelo de amenaza sísmica.

Al final del análisis se encontró que las estructuras que aportan más al costo de pérdidas estructurales (USD) mediante el cálculo de eventos estocásticos pertenecen a la tipología que se caracterizan por ser de adobe, tener un sistema a carga lateral de muro, no ser dúctiles y tener dos pisos de elevación con el 24.1% del total de pérdidas estructurales. Además, se encontró que en un periodo de retorno de 475 años se tendrá una pérdida económica de \$ 41'000,000 (USD), este valor agregado engloba todas las tipologías encontradas, se tomó en cuenta que los eventos sísmicos más probables dentro de la zona en estudio tendrían una magnitud entre 6 a 7.5 Mw y se caracterizan por ser fallas corticales.

Palabras clave: *exposición, amenaza, vulnerabilidad, riesgo, eventos estocásticos*

ABSTRACT

This work of investigation, it is a preliminary study of seismic risk in the city of Quito is made using stochastic events for a period of return of 475 years with a probability of exceedance of 10% according to the establishment of the Ecuadorian Norm of the Construction (NEC2015), it also applied the methodology of the foundation Global Earthquake Model (GEM) with the help of the open-source software OpenQuake.

The exposure model is developed in collaboration with civil engineering students from the Catholic University of Ecuador. This study focuses mainly on structures for residential use in the Historical Center of Quito, characterized by the functions of fragility and vulnerability in the research carried out by Martins and Silva (2020); the seismic hazard model is obtained from the South America Risk Assessment (SARA) project developed between 2013 and 2015 by GEM; and the calculation of the seismic risk where the annual economic losses determined by using software OpenQuake from the stochastic events calculated in the seismic hazard model.

At the end of the analysis, it was found that the structures that contribute more to the cost of structural losses (USD), through the calculation of stochastic events belong to the typology that is characterized by being made of adobe, having a system with lateral wall load, not being ductile and having two floors of elevation with 24.1% of the total structural losses. In addition, it was found that in a return period of 475 years there will be an economic loss of \$ 41'000,000.00 (USD), this added value includes all the typologies found, it was considered that the most probable seismic events within the area under study would have a magnitude between 6 to 7.5 Mw and are characterized by cortical faults.

Key words: *exposure, hazard, vulnerability, risk, stochastic events*

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 <i>Objetivo general</i>	15
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	15
1.2 Justificación.....	15
2. MODELO DE EXPOSICIÓN	16
2.1 Información preliminar.....	16
2.2 Distrito Metropolitano de Quito.....	16
2.3 Área de estudio.....	16
2.3.1 <i>Delimitación geográfica de la zona de estudio</i>	17
2.4 Variables que forman parte de la metodología.....	17
2.4.1 <i>Tipo de material de pared</i>	18
2.4.2 <i>Sistema estructural</i>	19
2.4.3 <i>Número de pisos</i>	21
3. MODELO DE AMENAZA SISMICA	23
3.1 Fuentes sismogénicas del Ecuador.....	23
3.2 Terremotos que afectaron a Quito.....	24
3.3 Análisis Probabilístico de Amenaza Sísmica.....	26
3.3.1 <i>Eventos estocásticos (Event-based Hazard)</i>	26
4. VULNERABILIDAD SISMICA	32
4.1 Métodos para calcular vulnerabilidad.....	32
4.2 Tipología Estructural.....	33
4.2 Curvas de Vulnerabilidad.....	35
5. RIESGO SÍSMICO	38
5.1 Riesgo Sísmico Probabilístico Basado en Eventos Estocásticos.....	38
5.1.1 <i>Párametros para calcular riesgo en el CHQ</i>	39
5.2 Resultados del análisis de riesgo.....	39
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
6.1 CONCLUSIONES.....	42
6.2 RECOMENDACIONES.....	43
7. BIBLIOGRAFÍA	44
ANEXOS A: Parroquias urbanas del DMQ	49

ANEXOS B: Parroquias rurales del DMQ	50
ANEXOS C: Archivos de configuración para evento-based PSHA.....	51
ANEXOS D: Tipología estructural según el GEM y su conversión.....	52
ANEXOS E: Curvas de vulnerabilidad y estructuras características	53
ANEXOS F: Archivo de configuración para evento-based risk PSHA	63
ANEXOS G: Edificaciones con mayor pérdida estructural (USD)	64

INDICE DE ILUSTRACIONES Y FIGURAS

Ilustración 1: Delimitación por manzanas del Centro Histórico de Quito	17
Ilustración 2: Mampostería confinada.....	20
Ilustración 3: Estructura aporticada	20
Ilustración 4: Mampostería no reforzada.....	21
Ilustración 5: Sistema de entepiso de Losa Plana.....	21
Ilustración 6: Número de Pisos de las estructuras del CHQ.....	22
Ilustración 7: Archivos de entrada para eventos basados en PSHA	27
Ilustración 8: Ubicación geográfica del DMQ	27
Ilustración 9: Ubicación geográfica del CHQ	28
Ilustración 10: Planos de falla por el tipo de región tectónica.....	29
Ilustración 11: Magnitudes esperadas para cada plano de falla.....	30
Ilustración 12: Ángulos de inclinación de un plano de ruptura	30
Ilustración 13: Plano de falla encontrado en el modelo de amenaza sísmica.....	31
Ilustración 14: Edificación característica de MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2.....	36
Ilustración 15: Edificación característica de MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3	37
Ilustración 16: Archivos de entrada/salida para riesgo basado en eventos estocásticos	38
Ilustración 17: Mapa de pérdidas estructurales (USD) por edificio	40
Figura 1: Porcentajes de Material de Pared de las edificaciones del CHQ	19
Figura 2: Porcentaje con respecto al número de pisos de las estructuras del CHQ.....	22
Figura 3: Porcentajes de cada tipología estructural dentro del total encontradas en el CHQ. .	35
Figura 4: Tipología estructural MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2	36
Figura 5: Tipología estructural MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3	36
Figura 6: Pérdida estructural vs. Periodo de retorno.....	40
Figura 7: Porcentaje de pérdidas estructurales (USD) por tipología	41

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales terremotos que afectaron a Quito	25
Tabla 2: Información del plano de falla de la Ilustración 12	31
Tabla 3: Edificios con mayor pérdida estructural (USD)	41

1. INTRODUCCIÓN

Ecuador es un territorio tectónico activo, está ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, zona donde se produce el 80% de liberación de energía sísmica del planeta. La interacción entre las placas Sudamericana y Nazca permite que se acumulen esfuerzos en la zona de contacto, es la fuente generadora de sismos tectónicos donde se forma una zona de subducción frente a las costas. Por lo tanto, se considera como una zona de alto peligro sísmico por las fallas geológicas existentes. El sistema de fallas activo más importante del Ecuador es el Pallatanga-Chingual (Yépez, 2012).

La ciudad de Quito se encuentra ubicada en el Callejón Interandino sobre el sistema de fallas de Quito, es una de las ciudades con mayor riesgo sísmico del Ecuador (Beauval et al., 2018). El sistema de fallas se ubica al Este de la ciudad a lo largo de las pendientes que miran los Valles de Tumbaco y Los Chillos donde se observan las colinas que rodean el borde oriental de la ciudad; a éstas se les conoce como lomas de Tablón frente a Amaguaña, Puengasí, Lumbisí, La Bota, El Batán, y Bellavista-Catequilla. Donde se estima que si llega a darse un sismo éste tendría una magnitud de 6 a 6.5 Mw (Rivadeneira et al., 2015).

Estos sismos de alta intensidad podrían llegarse a dar debido a que Quito tiene una falla inversa con una longitud de alrededor de 60 kilómetros, donde uno de los bloques (el de Quito) se levanta respecto al otro (los valles) en contra de la fuerza de gravedad dada por fuerzas de compresión tectónica que empujan al continente desde el Occidente (Vaca, Vallée, Nocquet & Alvarado, 2019). Por lo tanto, la cuenca se levanta unos 400 metros sobre el nivel del Valle Interandino por la fuerza de sismos repetitivos que ha tenido a lo largo de su historia geológica.

Al encontrarse el Centro Histórico de Quito (de aquí en adelante se le llamará CHQ) en la capital y tener componentes de amenaza sísmica y vulnerabilidad, por un posible evento sísmico de gran magnitud se requiere identificar las zonas con mayor índice de

susceptibilidad, estructuras que se llegarían a dañar y las pérdidas cuantitativas que este fenómeno generaría. Por consiguiente, el estudio de riesgo se realizó en el CHQ ya que fue declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1978 y de las que mejor se han conservado en América Latina, éste alberga 4,286 inmuebles inventariados como patrimoniales y solo 130 de ellos se catalogan como monumentales en un área de 3.75 km².

Para realizar este análisis, se utilizó el software OpenQuake (de aquí en adelante se le llamará OQ) que fue desarrollado por la fundación Global Earthquake Model (de aquí en adelante se le llamará GEM), éste combina evaluaciones de amenaza y riesgo, se pueden realizar escenarios de riesgo y análisis probabilísticos a diferentes escalas, permite un amplio espectro de incertidumbre para comprender que tan alejados o que tan precisos están los cálculos. Además, es un software gratuito, público y de código abierto (Global Earthquake Model Foundation, 2020). Por ejemplo, en Latinoamérica, se realizó el proyecto South America Risk Assessment (de aquí en adelante se le llamará SARA) que se enfocó en calcular el riesgo para varias ciudades, entre ellas Quito, a partir de escenarios seleccionados para reconocer la importancia que estos estudios tienen en la comunicación del riesgo (SARA Wiki, 2020) . OQ llega a cumplir con una amplia gama de propósitos sobre la reducción y gestión de riesgo de desastres naturales.

La fundación GEM se formó en 2009 en Pavía, Italia como una asociación público-privada sin fines de lucro que motiva a una colaboración mundial para el desarrollo de recursos científicos, de alta calidad y que serían utilizados para una evaluación del riesgo de terremotos y de esa manera facilitar la aplicación para la gestión de riesgos de forma global.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Realizar el estudio de riesgo sísmico del Centro Histórico de Quito aplicando el análisis de eventos estocásticos, empleando el software desarrollado por GEM llamado OpenQuake.

1.1.2 Objetivos específicos

- Consultar la bibliografía que sustente el estudio del riesgo sísmico del CHQ
- Tomar el Centro Histórico de Quito como muestra para el estudio.
- Organizar la información disponible en las bases de datos del modelo de exposición.
- Identificar las tipologías estructurales presentes en el CHQ según la nomenclatura del Global Earthquake Model.
- Utilizar el software OpenQuake para realizar el análisis de eventos estocásticos.
- Aplicar el análisis estocástico para saber la probabilidad de ocurrencia de los eventos.
- Estudiar las curvas de vulnerabilidad que se encuentran en la base de datos de Martins y Silva, 2020; y asignarlas a las tipologías estructurales.

1.2 Justificación

Este estudio tiene como finalidad evaluar las pérdidas económicas que puedan surgir debido a un evento sísmico en el Centro Histórico de Quito, de esta manera los tomadores de decisiones estarán preparados para afrontar los gastos en caso de que ocurra uno de estos eventos y puedan tener recursos destinados con anterioridad para el mismo.

2. MODELO DE EXPOSICIÓN

El modelo de exposición se refiere a la ubicación y localización de todas las infraestructuras de una ciudad, así como las personas, y la vulnerabilidad se enfoca en los bienes y las personas que pueden sufrir daños ante la ocurrencia de un evento sísmico.

2.1 Información preliminar

De acuerdo con la Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda del Distrito Metropolitano de Quito, durante el período 2001-2008 existían 357 asentamientos informales y 356 barrios legalizados, se estima que más del 60% de la ciudad de Quito forma parte de las edificaciones informales aunque no existe un estudio que cuantifique el número real (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2011), este porcentaje indica que un número alto de construcciones están fuera de un control predeterminado por la Norma Ecuatoriana de Construcción.

2.2 Distrito Metropolitano de Quito

El Distrito Metropolitano de Quito (de aquí en adelante se le llamará DMQ) o Cantón Quito perteneciente a la provincia de Pichincha tiene 4,230 km² de superficie, una población de 2,871,388 habitantes, y corresponde al 16.40% del total de la población de Ecuador. Está dividida en nueve administraciones zonales, las cuales contienen treinta y tres (33) parroquias rurales, y treinta y dos (32) urbanas. En la Ilustración se muestra la división del DMQ con sus respectivas parroquias urbanas (ver Anexo A) y en la Ilustración se muestra la división del DMQ con sus respectivas parroquias rurales (ver Anexo B).

2.3 Área de estudio

El Centro Histórico de Quito (CHQ) se fundó en 1534, está ubicado en el centro sur de la ciudad, es parte de la parroquia Distrito Metropolitano de Quito y de la administración zonal Manuela Sáenz. Delimitada por las parroquias al norte San Juan e Itchimbía, al sur La

Magdalena, al oeste La Libertad y al este Chimbacalle e Itchimbía. Presenta una tasa de densidad demográfica alta de 10,823 hab/km², y 15,570 viviendas.

2.3.1 Delimitación geográfica de la zona de estudio



Ilustración 1: Delimitación por manzanas del Centro Histórico de Quito
Elaborado por Jadira Llugsha

Hay 4 zonas censales, la Ilustración 1 muestra la ubicación geográfica, al noreste limita con la calle Francisco de Calda, al noroeste la calle Carchi, al sureste la avenida Pedro Vicente Maldonado y al suroeste la calle Rocafuerte (Tomado de Google Maps).

La zona en estudio está conformada por 101 manzanas, 2,126 edificaciones, donde el 55.64% corresponde a edificaciones residenciales y el 44.36% está distribuido entre las instituciones educativas, centros culturales, inmuebles patrimoniales y entidades públicas que se encuentran en el territorio delimitado.

2.4 Variables que forman parte de la metodología

El estudio está focalizado solo en edificaciones de uso residencial, es decir, todos los inmuebles que se construyeron con este fin, pero fueron usados como instituciones

educativas, museos, patrimonios culturales, entidades públicas, entre otras, fueron descartadas del presente estudio. Se tomó en cuenta tres (3) variables importantes: el tipo de material, el sistema estructural y el número de pisos de las estructuras residenciales que comprende el área delimitada, a continuación, se describe.

2.4.1 Tipo de material de pared

Hay cuatro tipos de materiales de pared usados en las 1,183 viviendas del CHQ, Ladrillo, Adobe, Mampostería de Bloque y Concreto:

- ❖ **El ladrillo** es un material de construcción fabricado de masa de barro cocida, permite construir cualquier muro o estructura y tiene resistencia a la compresión. Hay 41.17% de construcciones de este material y según la taxonomía de GEM se denomina [CLBRS].
- ❖ **El adobe** es un material elaborado a base de una masa de barro conformada de arcilla o arena, ésta se mezcla con paja para darle una forma de ladrillo y se pone al sol a secar, el adobe se utilizaba para construir paredes y muros. Hay 24.26% de construcciones de este material y según la taxonomía de GEM se denomina [ADO].
- ❖ **Mampostería de Bloque** o también conocido como bloque de hormigón es un material prefabricado de cemento de alta resistencia y durabilidad, se utiliza en la construcción de paredes y muros. Hay 34.40% de construcciones de este material y según la taxonomía de GEM se denomina [CR]
- ❖ **El concreto** es la mezcla de cemento, agua, material fino (arena) y grava, cuando se solidifica forma el material de fabricación más resistente para construir bases y paredes. Hay 0.17% de construcciones de este material y según la taxonomía de GEM se denomina [CB99]. (Ver Figura 1)

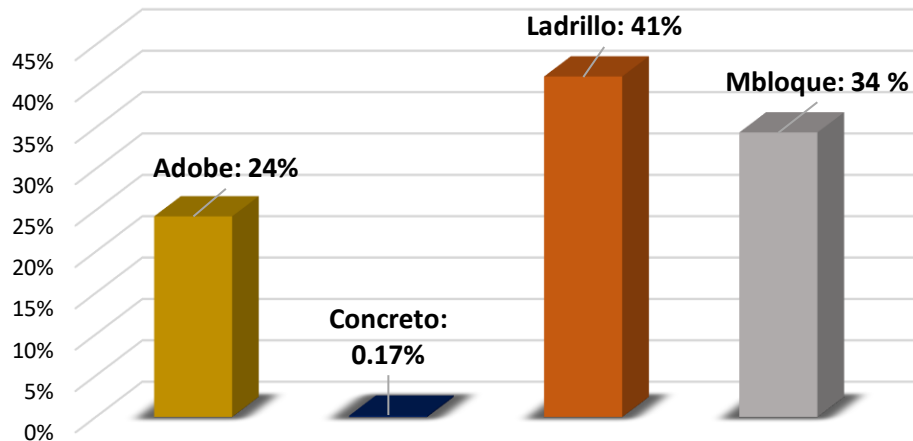


Figura 1: Porcentajes de Material de Pared de las edificaciones del CHQ
Elaborado por Jadira Llugsha

2.4.2 Sistema estructural

Con ayuda del visualizador Google Earth pro y la información proporcionada en la cédula catastral de cada estructura se determinó individualmente el sistema estructural que le caracteriza a cada una. Las edificaciones se clasificaron en tres tipos de sistemas de resistencia a carga lateral: muros con un 68.22%, pórticos con un 30.68% y losas planas con 1.1%.

La mampostería confinada denominada por el GEM [MCF] es aquella que se construye usando muros de ladrillo y están rodeados por elementos de hormigón reforzado, los muros de ladrillos al estar confinados con las columnas y vigas de concreto actúan monolíticamente (Carrillo & González, 2006). Además, soportan el peso de paredes y techo, edificaciones hechas en la parte superior y también las embestidas del viento.

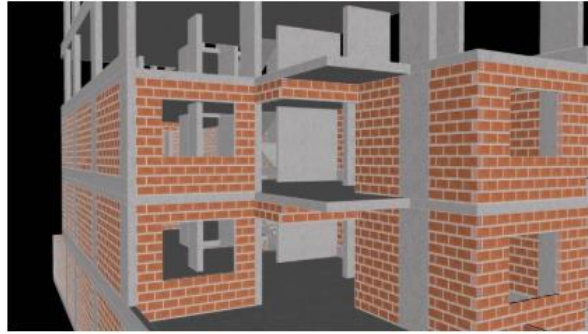


Ilustración 2: Mampostería confinada
Fuente: IngeCivil, 2020

El pórtico de hormigón armado denominado por el GEM [CR] es un sistema resistente a momentos, no posee diagonales y resiste fuerzas horizontales y cargas verticales. Se caracterizan por soportar cargas muertas, son flexibles y atraen solicitaciones sísmicas pequeñas y disipan energía ya que sus elementos poseen ductilidad. Por otro lado, tienen baja rigidez a cargas laterales y su flexibilidad permite desplazamiento y esto causa daños en los elementos estructurales y no estructurales.

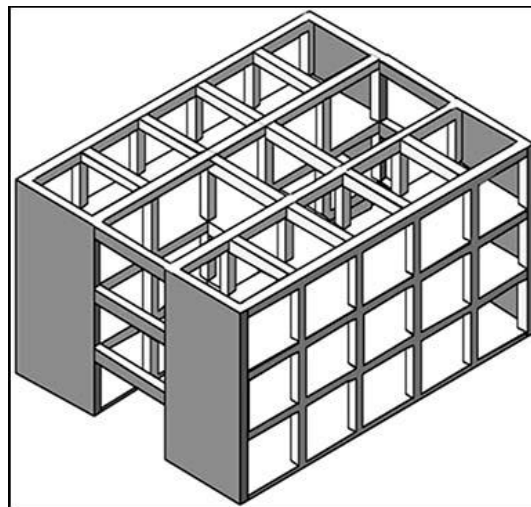


Ilustración 3: Estructura aporticada
Fuente: IngeCivil, 2020

Mampostería no reforzada o muros no estructurales denominado por la GEM [MUR] es el sistema estructural conformado por elementos de mampostería adheridas con mortero y no cumple con las cuantías mínimas de acero de refuerzo para considerarse como

mampostería semi reforzada (Carrillo & González, 2006). Este tipo de estructura no cuenta con refuerzo por lo tanto presenta un alto porcentaje de riesgo.



Ilustración 4: Mampostería no reforzada
Fuente: IngeCivil, 2020

Las losas planas denominadas por el GEM [RC] son sistemas de hormigón armado que transmiten cargas a las columnas sin necesidad de colocar vigas. Estos sistemas a carga lateral no son adecuados para zonas sísmicas, ya que no poseen paredes de cemento reforzadas ni soportes laterales, esto hace que la estructura se mueva demasiado.



Ilustración 5: Sistema de entrepiso de Losa Plana
Fuente: IngeCivil, 2020

2.4.3 Número de pisos

Las construcciones residenciales varían en cuanto al número de pisos: 177 estructuras de 1 piso, 589 estructuras de 2 pisos, 328 estructuras de 3 pisos, 64 estructuras de 4 pisos, 15 estructuras de 5 pisos, 8 estructuras de 6 pisos y 2 estructuras de 7 pisos. A continuación, en la Figura 6, se detalla el porcentaje correspondiente por el número de pisos con respecto a las

1,183 viviendas residenciales del CHQ y en la Ilustración 5 se muestra las edificaciones con su respectivo código de color.

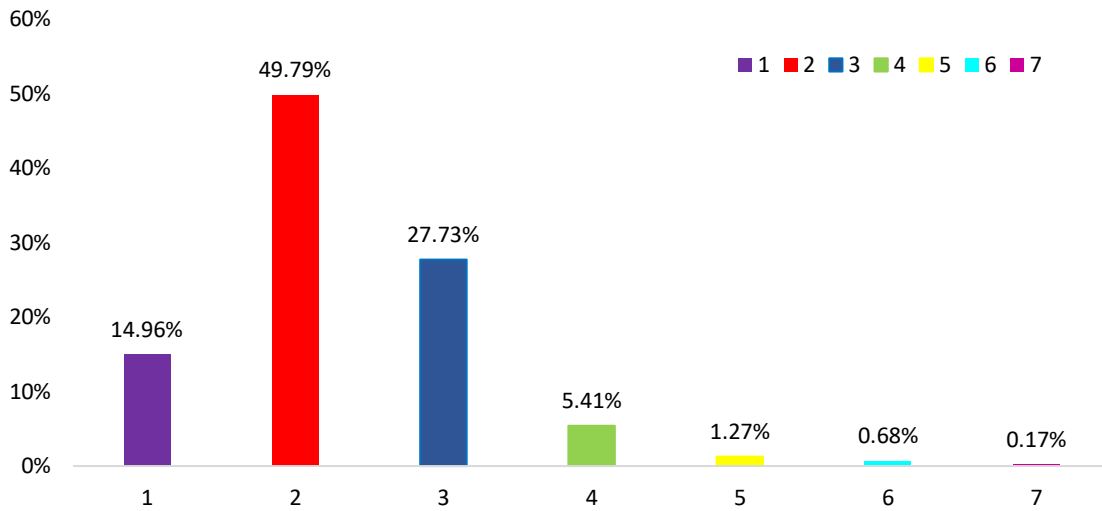


Figura 2: Porcentaje con respecto al número de pisos de las estructuras del CHQ
Elaborado por Jadira Llugsha

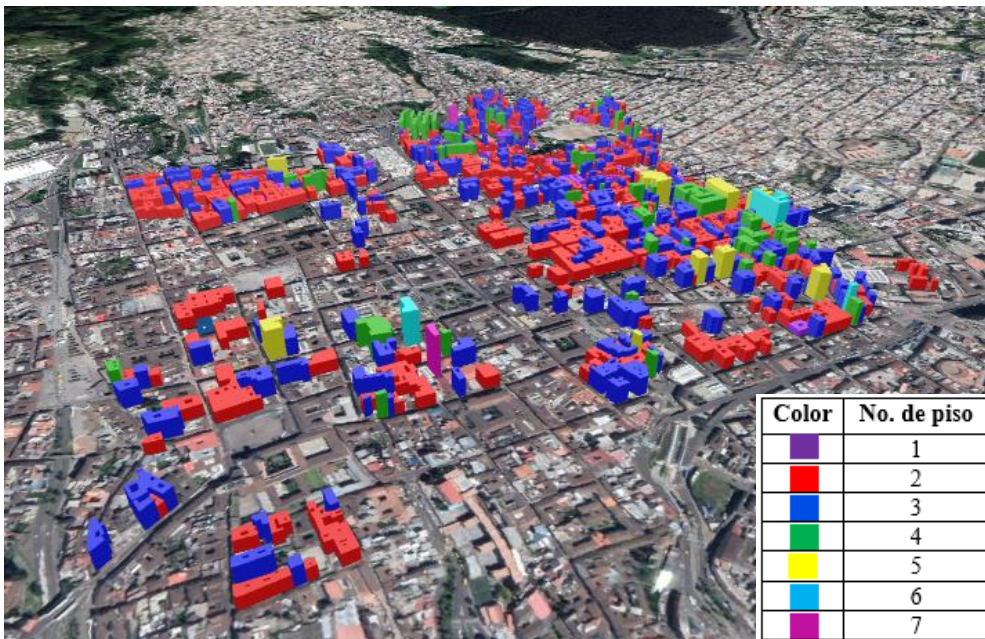


Ilustración 6: Número de Pisos de las estructuras del CHQ
Elaborado por Jadira Llugsha

3. MODELO DE AMENAZA SISMICA

3.1 Fuentes sismogénicas del Ecuador

Ecuador está expuesto a alto riesgo sísmico por subducción, con terremotos de magnitud moderada a grandes magnitudes. Una nueva visión geodinámica de Ecuador ayudó a definir Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA), donde las deformaciones sísmicas se pueden ver mediante modelos de placas tectónicas, así mismo se sabe que los eventos de fallas coloidales poco profundos son destructivos y para este caso se utilizan métodos empíricos para predecir futuros eventos. En 1951, se crea el Ecuadorian Building Code (EBC), el cual divide al país en cuatro zonas sísmicas. En 2015 pasa a ser la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). En este se habla de un nuevo modelo de amenaza que redefine una zona sísmica nacional y proporciona Peak Ground Acceleration (PGA) y valores de incertidumbre de espectro de respuesta de diseño.

Según Beauval (et al, 2018) para estimar frecuencias en fuentes sismogénicas el modelo más utilizado es Gutenberg-Richter, el cual es restringido porque se tiene que tomar en cuenta la certeza en el modelo de ocurrencia. Existe una incertidumbre en la ubicación, magnitud hipocentral, elección de ecuaciones de conversión de magnitud, identificación de eventos agrupados, periodos, rangos de magnitud y método de recurrencia.

El país ha tenido diferentes terremotos de magnitud superior a 7 Mw, por lo que está catalogado como una zona sísmicamente peligrosa en el mundo. Además de comprender las características estructurales activas del país, no solo es necesario estudiar la dinámica, cinemática y posibles terremotos genéticos de diferentes fallas, sino también estudiar la recurrencia de los terremotos (Hibsch, Alvarado, Yopez, Sébrier & Pérez, 1996).

Por ejemplo, los sismos de subducción que han afectado la zona costera, como el de 1906 de la provincia de Esmeraldas que alcanzó una magnitud de 8.9 y ocasionó intensidades de grado VI en la escala de Medvédev-Sponheuer-Kárník (MSK) en la zona de Quito. Sin embargo, en la actualidad se pueden temer daños que representen intensidades superiores en la capital, en especial a los edificios altos, que son vulnerables a la duración y frecuencia de las ondas generadas por tales sismos. En 1859, un terremoto produjo intensidades de grado IX (MSK) en Quito y Otavalo, siendo un área macrosista muy extendida en la parte central del Valle Interandino (Hibsch, Alvarado, Yopez, Sébrier & Pérez, 1996).

El modelo que se basa en la fuente del área de la corteza que encierra el sistema principal de fallas, se compone por Puna, Pallatanga, Cosanga y Chingual. Donde la actividad de la falla Pallatanga en la parte sur del Valle Interandino está relacionada con la destrucción de la ciudad de Riobamba causada por el terremoto de 1797 de intensidad XI en Quito. Por otro lado, Quito-Latacunga se encuentra en la zona norte del sistema de falla “El Ángel”.

3.2 Terremotos que afectaron a Quito

La ciudad de Quito ha sido perjudicada por varios terremotos por lo que es de suma importancia una constante evaluación de riesgo sísmico. La Red Acelerométrica RENAC, hace un par de años comenzó a mejorar el conocimiento de los posibles efectos que sucederán en un futuro (Laurendeau et al, 2017). Uno de los métodos estudiados es el de la relación espectral horizontal a vertical, HVSR, el cual emplea ruido y estima picos de frecuencia. Quito se encuentra en una depresión interandina, cuya elevación es 2200-3000 msnm. Su población se acerca a los 3 millones de habitantes y sus viviendas mal construidas se sitúan en lugares inestables, por lo tanto, los daños futuros podrían ser devastadores.

En los 486 años de historia escrita de Quito, se han registrado varios eventos sísmicos que alcanzaron intensidades de grado IV (MSK). Entre las múltiples causas que han provocado los terremotos y que han causados daños a la ciudad, está la falla de Quito, cuya actividad puede producir una intensidad de más de VIII grados, lo que la convierte en una zona de alto riesgo para la población (Alvarado et al., 2012). En los registros históricos, el terremoto de 1755 es la causa principal de la actividad de la falla, que alcanzó una intensidad de 8-9 grados (MSK) (Hibsch, Alvarado, Yopez, Sébrier & Pérez, 1996).

El sistema de fallas de Quito consiste en una falla inversa con una longitud de alrededor de 60 km, donde uno de los bloques (el de Quito) se levanta respecto al otro (los valles) en contra de la fuerza de gravedad, se muestra una serie de colinas alineadas de baja altura que se inician en el sector de Tambillo y continúa al norte con las lomas de Puengasí, Lumbisí, el Batán, La Bota, Bellavista y Catequilla. (Rivadeneira et al, 2007). Esta falla provocó que la zona en donde se ubica la ciudad este elevada sobre el resto del Callejón Interandino entre 300 y 400 m, por lo tanto, se estiman eventos de magnitud superior o igual a 4.0 grados en la escala de Richter.

A continuación, se muestra en la tabla 1 los principales terremotos que afectaron a Quito:

Tabla 1: Principales terremotos que afectaron a Quito
Fuente: Naya, 2010

Año	Zona	Mw	Intensidad MSK, máx	Intensidad MSK en Quito
1587	Guayllabamba	6.4	VIII	VIII
1698	Ambato	7.2	IX	VII
1797	Riobamba	7.6	XI	VII
1859	Quito	7.2	VIII	VIII
1868	Ibarra	7.25	IX	VII

3.3 Análisis Probabilístico de Amenaza Sísmica

El método de Análisis Probabilístico de Amenaza Sísmica, por sus siglas en inglés PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Analysis), es considerado la mezcla de tres modelos: 1) modelo de tasa de sismicidad (SRM); 2) modelo de caracterización del movimiento del suelo (GMCM); y 3) modelo de incertidumbre.

El modelo SRM predice futuros casos de sismicidad expresados en tasa de sismicidad. El modelo GSMCM estima movimiento de suelo en una ubicación particular para un sismo específico utilizando un modelo de fuente. Y el modelo de incertidumbre define como los componentes se combinan y que incertidumbres son propagadas hasta el resultado final (Gestenberger et al, 2020).

3.3.1 *Eventos estocásticos (Event-based Hazard)*

Los eventos estocásticos basados en PSHA es un proceso de selección que por lo regular considera un evento hipotético cuya ubicación y magnitud se derivan sobre la base de la geometría de la falla y los datos de sismicidad (Pagani, Johnson & García, 2019). El objetivo de realizar este análisis es generar un catálogo más grande de eventos aleatorios según la probabilidad de ocurrencia. Se utilizó el software de código abierto, OpenQuake, para el análisis de eventos estocásticos en la ciudad de Quito, focalizando el CHQ. En la siguiente ilustración se detalla los archivos de entrada para general el modelo de Event-based Hazard.

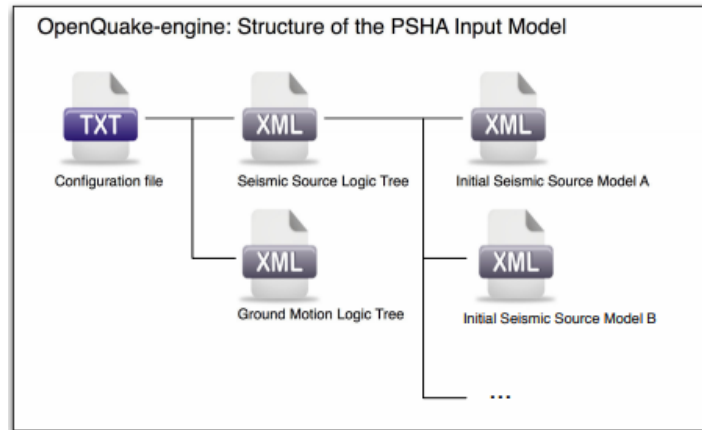


Ilustración 7: Archivos de entrada para eventos basados en PSHA
Fuente: GEM, 2019

Los parámetros principales (Ver Anexo C para observar el archivo de configuración) para modelar Event-based PSHA son:

➤ Sitios de amenaza

❖ **Espacio entre grillas:** 1 km

❖ **Área:** polígono de 4 puntos comprende Longitud y Latitud

$[(-78.6, -0.04^\circ), (-78.3, -0.04^\circ), (-78.3, -0.41^\circ), (-78.6, -0.41^\circ)]$

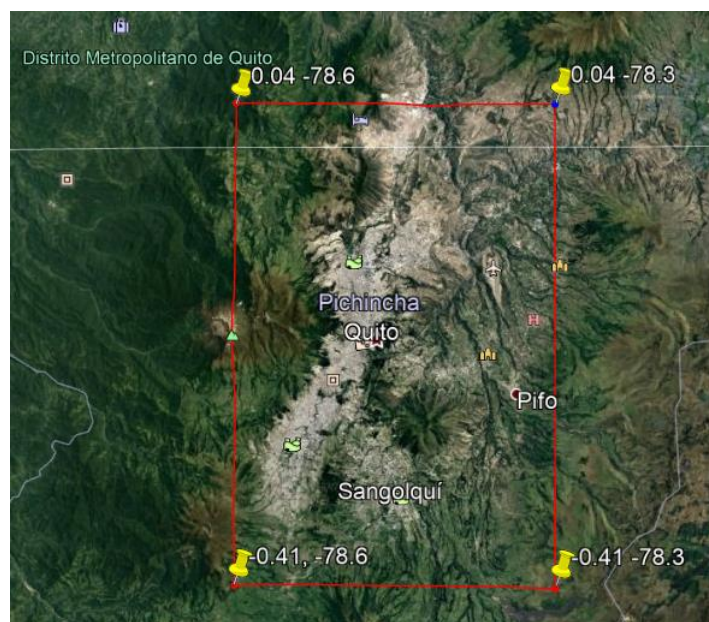


Ilustración 8: Ubicación geográfica del DMQ
Elaborado por Jadira Llugsha

❖ **Área:** polígono de 4 puntos comprende Longitud y Latitud

$[(-78.51, -0.21^\circ), (-78.52, -0.21^\circ), (-78.51, -0.22^\circ), (-78.52, -0.22^\circ)]$

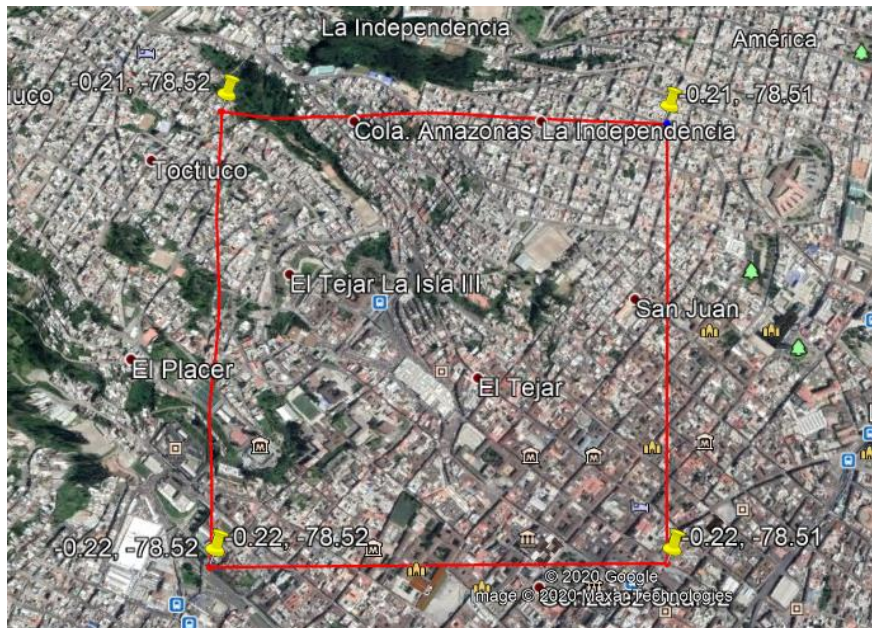


Ilustración 9: Ubicación geográfica del CHQ
Elaborado por Jadira Llugsha

- Condiciones del sitio: archivos provenientes del modelo de SARA
 - ❖ **Source_model_logic_tree.xml**
 - ❖ **Gmpe_logic_tree.xml**
- Cálculo de amenaza
 - ❖ **Tipos de medidas de intensidad:** PGA [0.05]
 - ❖ **Distancia máxima:** 300 km
 - ❖ **Nivel de truncamiento:** 3 desviaciones estándar
 - ❖ **Tiempo de investigación:** 1 año de duración
 - ❖ **Sets de eventos sísmicos:** 5000 sets
 - ❖ **Número de ramas del árbol lógico de las GMPE's:** 10 ramas

Se tiene como resultado $5000 \text{ sets} * 10 \text{ ramas} * 1 \text{ año} = 50000$ años de sismicidad que corresponde a un periodo de retorno de 475 años establecido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (10% de excedencia en 50 años).

- Archivos de salida:
 - ❖ **Rupturas de terremotos:**

En la ilustración 10 se observan los sistemas de fallas tectónicas que se obtuvo al correr event-based PSHA: **subducción de interfaz** (Subduction Interface) que está en función de la proximidad del hipocentro y al volumen de la losa descendente; **subducción de intra-placa** (Subduction IntraSlab) que es el conjunto de curvas que indican la profundidad de la parte superior de la losa a lo largo de las secciones transversales perpendiculares a la zanja; **corteza poco profunda activa** (Active Shallow Crust); y **corteza poco profunda estable** (Stable Shallow Crust).

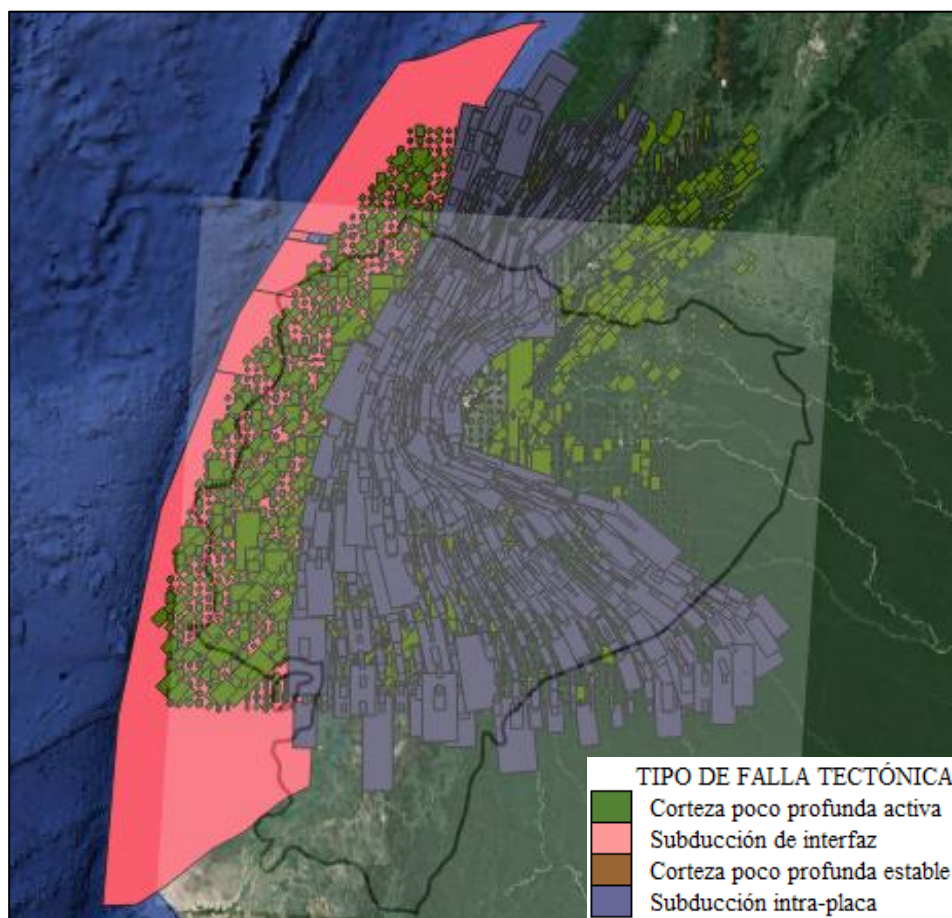


Ilustración 10: Planos de falla por el tipo de región tectónica
Elaborado por Jadira Llugsha

En 50000 años de sismicidad se estiman 248 eventos estocásticos que afectarán al CHQ, en la ilustración 11 se observa que los planos de falla tendrán una magnitud entre 6.00 y 7.5. Se requiere realizar un estudio de riesgo sísmico para el área analizada.

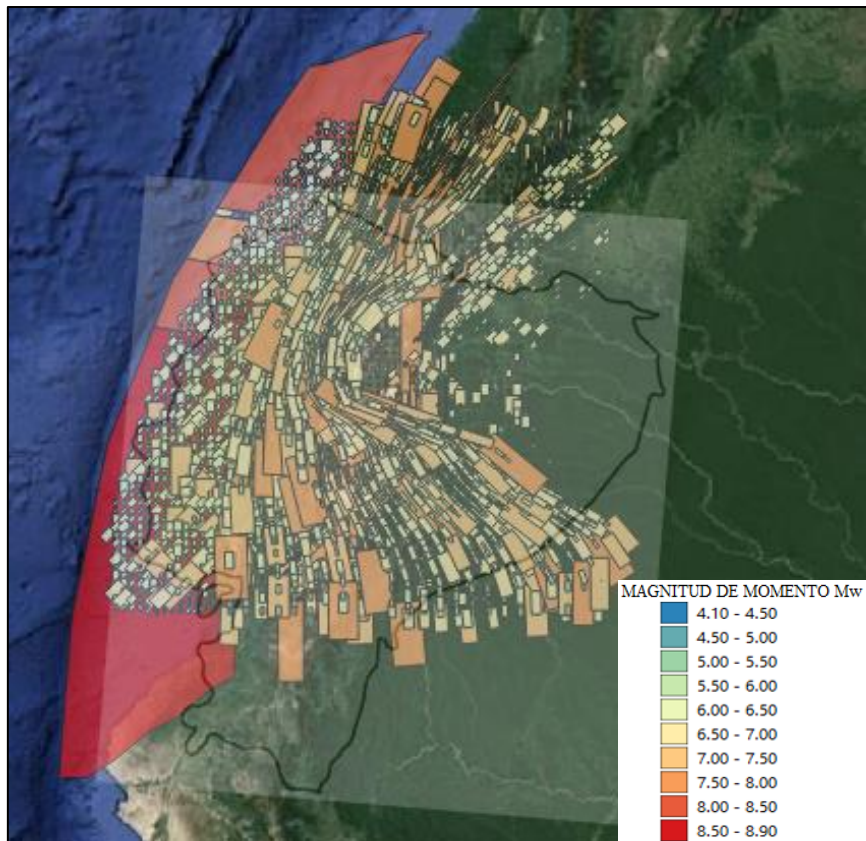


Ilustración 11: Magnitudes esperadas para cada plano de falla
Elaborado por Jadira Llugsha

Cada plano de falla cuenta con la siguiente información: magnitud, longitud del centroide, latitud del centroide, profundidad del centroide y sus ángulos de inclinación (rumbo de falla [strike], buzamiento del plano de falla [dip] y deslizamiento [rake], se observan en la Ilustración 12)

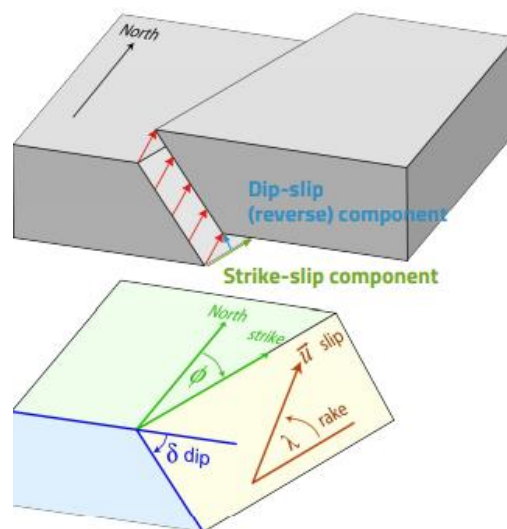


Ilustración 12: Ángulos de inclinación de un plano de ruptura
Fuente: Manual de OpenQuake, 2019



Ilustración 13: Plano de falla encontrado en el modelo de amenaza sísmica
Elaborado por Jadira Llugsha

Tabla 2: Información del plano de falla de la Ilustración 12

Característica	Valor
Magnitud	8.3
Longitud_centroide	-78.87445
Latitud_centroide	2.484939°
Profundidad_centroide	39.13771
Tipo de falla	Subducción de Interfaz
Rumbo	25.37711°
Buzamiento	15.87688°
Ángulo de movimiento	90°

4. VULNERABILIDAD SISMICA

Los terremotos son fenómenos naturales que suceden en diferentes partes del mundo, los más graves ocurren cuando están cerca de zonas habitadas, causando grandes pérdidas humanas y estructurales. A pesar de los avances en el área de la predicción sísmica, no se pueden predecir con precisión en tiempo, ubicación o magnitud. Por lo tanto, la principal forma de disminuir las pérdidas es construir estructuras de resistencia sísmica. Muchos estudios ilustran que los edificios más antiguos, que no están diseñados para resistir sismos, se han destruido en lugar de las edificaciones que han sido diseñados de acuerdo con códigos sísmicos.

La vulnerabilidad sísmica se define como un proceso de metodología aprobado para evaluar las deficiencias en una estructura que impide que el mismo alcance un objetivo de rendimiento seleccionado. La evaluación sísmica por vulnerabilidad es necesaria para lo siguiente: las edificaciones pueden no haber sido diseñados para resistir las fuerzas sísmicas o diseñados antes de la publicación de los códigos actuales, el estado de los edificios aparenta una mala calidad o está deteriorado con el tiempo y el cambio de uso del edificio y el suelo tiene un alto potencial de licuefacción. Después de realizar una evaluación sísmica se determina si la estructura puede ser demolida, reacondicionada para aumentar su capacidad, o modificada para disminuir su demanda sísmica.

4.1 Métodos para calcular vulnerabilidad

- Análisis Pushover es un método basado en la teoría de la dinámica estructural, que conserva la simplicidad conceptual y el atractivo computacional de los procedimientos actuales con una distribución de fuerza invariable, actualmente es muy usado en la práctica de ingeniería estructural. En este método, la demanda sísmica debida a términos individuales en la expansión modal de las fuerzas sísmicas efectivas se determina mediante análisis estáticos no lineales utilizando la

distribución de la fuerza de inercia para cada modo, en edificios asimétricos incluye dos fuerzas laterales y un par en cada nivel del piso. Estas demandas “modales” se combinan por la regla CQC (Combinación Cuadrática Completa) para obtener la estimación de la demanda sísmica total de sistemas inelásticos (Anil & Rakesh, 2004).

- Análisis dinámico incremental (IDA) es un método paramétrico que se ha dado en varias formas para estimar un rendimiento estructural más exhaustivo bajo cargas sísmicas. Consiste en someter un modelo estructural a uno o más registros de movimiento de tierra y cada uno está escalado a múltiples niveles de intensidad, de esa manera se producen una o más curvas de respuesta parametrizada frente al nivel de intensidad (Vamvatsikos, 2001).

4.2 Tipología Estructural

Cada tipología estructural se determinó a partir del modelo de exposición, tienen un nombre definido que sigue la taxonomía propuesta por GEM, se ejemplifica a continuación:

- Material del sistema resistente a cargas laterales:
 - CR** (Concrete Reinforced – Concreto reforzado)
 - MUR** (Masonry Unreinforced – Mampostería no reforzada)
- Tecnología del sistema resistente a cargas laterales:
 - CIP** (Cast in place – Fundido en sitio)
- Sistema resistente a cargas laterales:
 - LFINF** (Infilled frame-Sistema de pórticos rellenos con paredes de mampostería)
 - LFM** (Frame moment – Sistema de pórticos sin mampostería de relleno)
 - LWAL** (Wall – Sistema resistente de muros)
 - ADO** (Adobe – Adobe)
- Ductilidad

DUL (Low ductile - Ductilidad baja)

DUM (Medium ductile - Ductilidad media)

DUH (High ductile - Ductilidad alta)

DNO (Non-ductile – No ductil)

- Características del techo, rango de número de pisos

RMN (Concrete roof without additional covering – Techo de hormigón sin revestimiento adicional)

Se pudo identificar 27 tipologías para el CHQ, estas fueron reagrupadas en 12 tipologías donde se tomó en cuenta características similares y así la información obtenida poderla manipular mejor (ver Anexo D). La expresión para determinar las tipologías es la siguiente:

MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2

Mampostería no reforzada + Adobe _ Sudamérica _ Sistema resistente de muros – No dúctil_Altura2pisos

En la Figura 3, se puede observar el porcentaje que corresponde a las diferentes tipologías reagrupadas según la conversión.

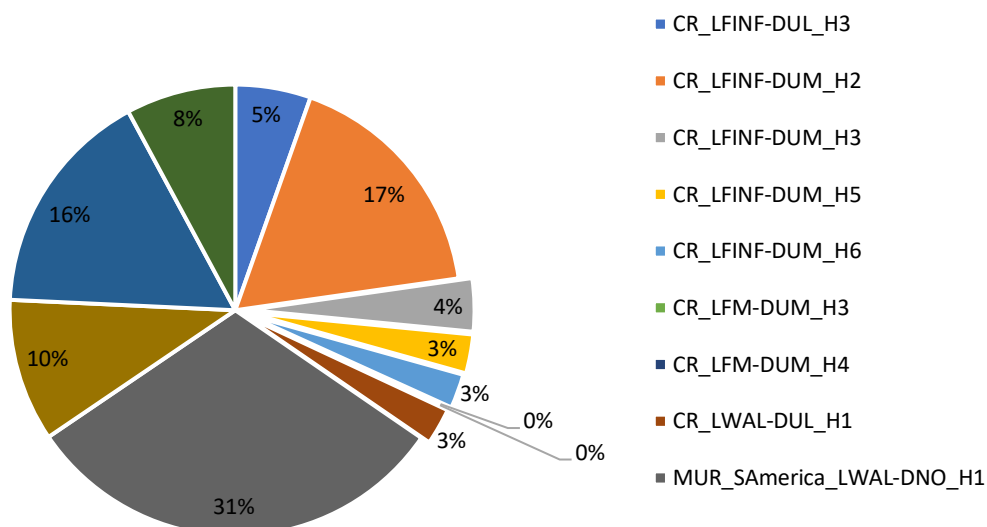


Figura 3: Porcentajes de cada tipología estructural dentro del total encontradas en el CHQ.
Elaborado por Jadira Llugsha

4.2 Curvas de Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es un paso esencial en la evaluación de riesgo sísmico probabilístico, en el estudio realizado por Martins y Silva (2020) se describe el desarrollo de un modelo de fragilidad analítica y vulnerabilidad, que cubre las clases de construcciones más comunes a escala global. En este estudio se cubrieron combinaciones de material de construcción, altura, sistema de resistencia a carga lateral y nivel de diseño sísmico, donde todo este conjunto de funciones se utilizó para la evaluación de pérdidas económicas debidas a terremotos como parte del modelo global de riesgo sísmico apoyado por la fundación GEM.

A continuación, se observan las curvas de vulnerabilidad que corresponden a las diferentes tipologías estructurales que fueron reagrupadas, éstas establecen una relación entre la intensidad de la agitación del terreno y el porcentaje de pérdida de valor u ocupantes perdidos o si es que se alcanza dicha intensidad.

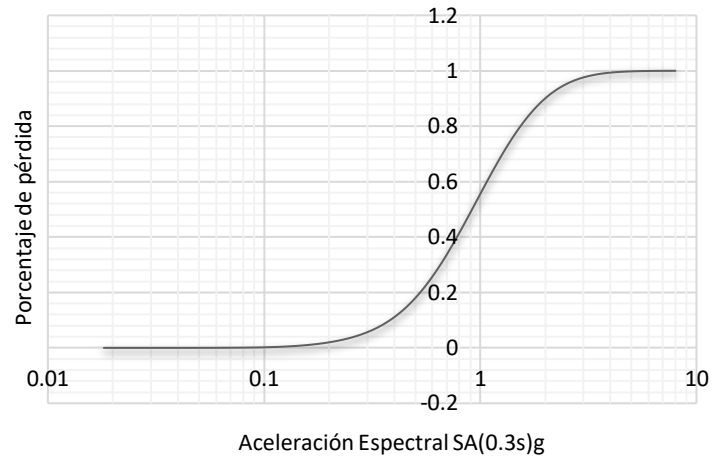


Figura 4: Tipología estructural MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2
Fuente: Martins y Silva, 2020



Ilustración 14: Edificación característica de MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2
Elaborado por Jadira Llugsha

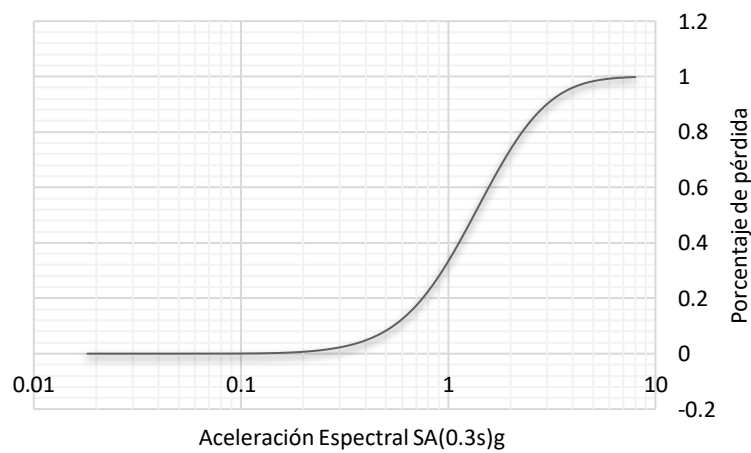


Figura 5: Tipología estructural MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3
Fuente: Martins y Silva, 2020



Ilustración 15: Edificación característica de MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3
Elaborado por Jadira Llugsha

(Ver las curvas de vulnerabilidad de las tipologías restantes con sus respectivas edificaciones en Anexo E).

5. RIESGO SÍSMICO

El riesgo de un terremoto en cualquier lugar depende del riesgo sísmico, así como de la vulnerabilidad de sus estructuras. La evaluación de riesgo considera la probabilidad de un terremoto de una magnitud o intensidad particular que afecta a un sitio específico (Villacís, 1997). El riesgo significa la pérdida esperada como vidas, lesiones, daños a la propiedad debido a un peligro particular para un área determinada y un período de referencia. Sobre la base de cálculos matemáticos, el riesgo es el producto de amenaza y vulnerabilidad (Varcárcel et al, 2013), en este estudio se realiza el análisis de pérdidas económicas del CHQ.

5.1 Riesgo Sísmico Probabilístico Basado en Eventos Estocásticos

Para este cálculo se emplea un enfoque de simulación de Monte Carlo basado en eventos para la evaluación probabilística del riesgo a fin de estimar la distribución de pérdidas para activos individuales y la distribución de pérdidas agregadas distribuida espacialmente dentro de un periodo de tiempo específico (GEM, 2019). Para realizar el cálculo, se requiere un archivo de configuración, un modelo de exposición, un modelo de vulnerabilidad para cada taxonomía representada en el modelo de exposición y un conjunto de eventos estocásticos (catálogo sintético) representativo de la sismicidad del área durante el periodo de tiempo especificado.

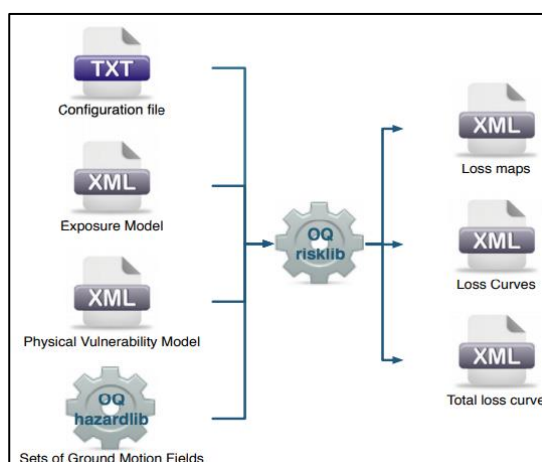


Ilustración 16: Archivos de entrada/salida para riesgo basado en eventos estocásticos
Fuente: GEM, 2019

5.1.1 Parámetros para calcular riesgo en el CHQ

Los parámetros principales del archivo de configuración (Ver Anexo F) para calcular Event-Based Risk PSHA son:

- Exposición:
 - ❖ **Archivo_exposición:** exposure_quito_ch_v1.0.xml
 - ❖ **Taxonomía_mapeo_csv:** ch_taxonomy_mapping.csv
- Vulnerabilidad
 - ❖ **Archivo_vulnerabilidad_estructural:** Quito_CH_vulnerability_v1.0.xml

5.2 Resultados del análisis de riesgo

El resultado del análisis de riesgo por eventos estocásticos en el CHQ es el siguiente:

- **Mapa de pérdidas estructurales (USD) por edificio:** las pérdidas en su mayoría son menores a 1,000 dólares ya que muchas de las estructuras son de 1 y 2 pisos de adobe y ladrillo. Mientras que las edificaciones con pérdidas mayores a 1,500 dólares son viviendas de 3 y 4 pisos.

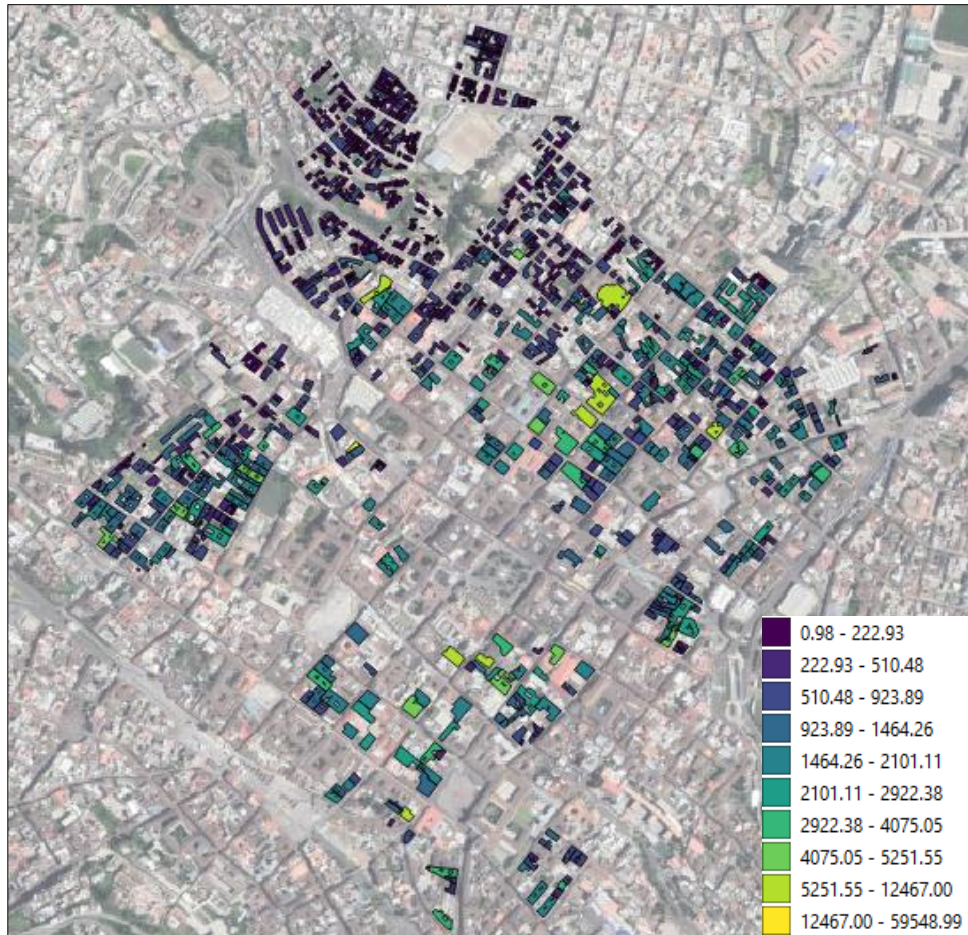


Ilustración 17: Mapa de pérdidas estructurales (USD) por edificio
Elaborado por Jadira Llugsha

- **Curva de pérdidas agregadas:** se realizó el análisis para 25,000 y 50,000 años de sismicidad y se observó que para un periodo de retorno de 475 años se tendrá aproximadamente \$41'000,000 en pérdidas estructurales.

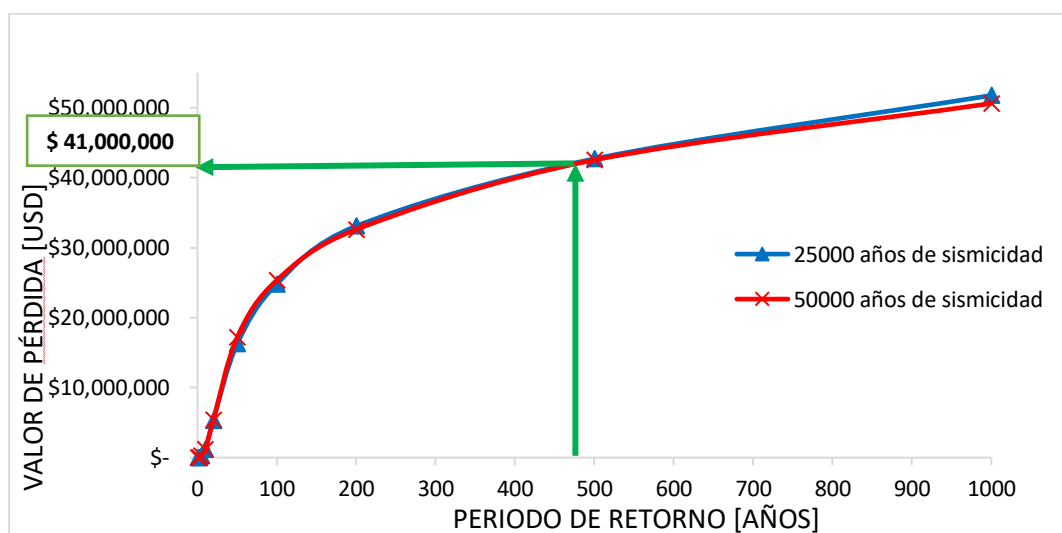


Figura 6: Pérdida estructural vs. Periodo de retorno
Elaborado por Jadira Llugsha

- **Suma total de las pérdidas estructurales del CHQ para 50,000 años de sismicidad:** se tiene una pérdida estructural total de \$ 1'075,225.80 que corresponde a los daños anuales que se generarían en caso de que un evento sísmico de magnitud 6.0 -7.5 Mw llegaría a producirse en el CHQ.

Mediante los resultados obtenidos se observa que los edificios que presentan mayores pérdidas estructurales corresponden a los siguiente (Ver Anexo G):

Taxonomía	Pérdida estructural (USD)
MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3	\$ 59,549.00
MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3	\$ 12,467.00

A continuación, en la Figura 7 están los porcentajes de costo por tipología estructural, en la cual se observa que la taxonomía con mayor pérdida (USD) es:

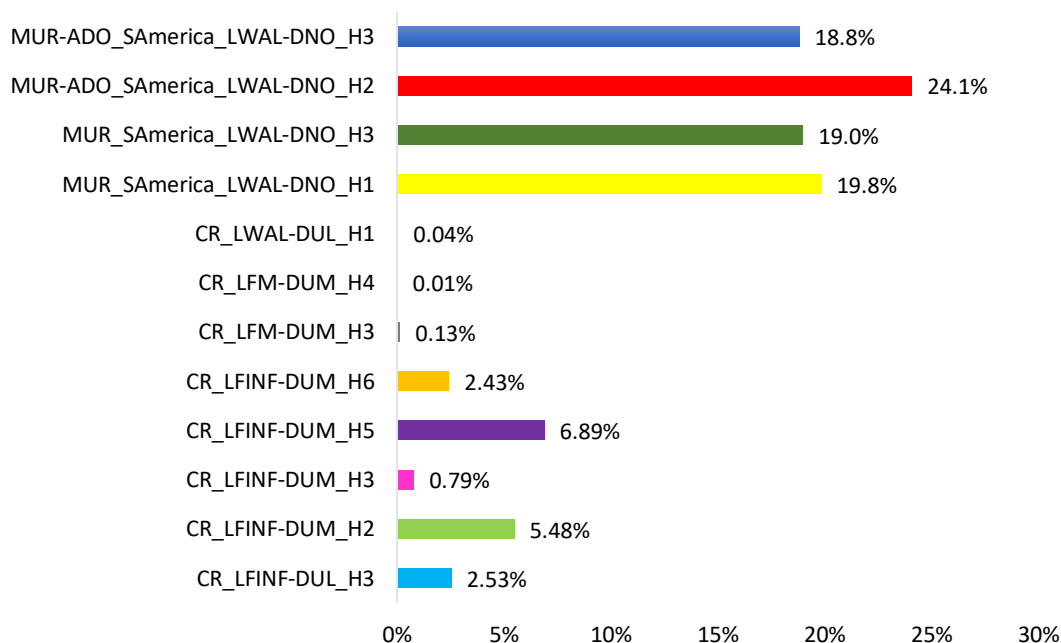


Figura 7: Porcentaje de pérdidas estructurales (USD) por tipología
Elaborado por Jadira Llugsha

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Mediante el mapa de amenaza sísmica obtenido en el software OpenQuake se observa que los terremotos corticales causarían destrucción en el CHQ, debido a que sus hipocentros tienen una profundidad menor, los sismos que llegarían a producirse tendrán una magnitud entre 6.0 a 7.5 Mw, es decir, según la literatura Quito por lo general tendrá sismos corticales debido a su falla geológica.
- La edificación más afectada generaría una pérdida estructural de \$ 59,549,00. (USD) si un sismo ocurriera en el CHQ. Esta estructura data del año 1920, tiene un área de 600 m² de construcción, un sistema lateral de muro, el material de pared es de ladrillo, el material de techo es de teja, es de uso residencial y comercial, no es dúctil y tiene 3 pisos de elevación (MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3).
- Las tipologías estructurales con mayor pérdida son:
 - ❖ MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2 con 24.1%
 - ❖ MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H1 con 19.8%
 - ❖ MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3 con 19.0%; y
 - ❖ MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3 con 18.8%.

Esto se debe a que las viviendas del CHQ datan entre los años 1747 y 1990, es decir, son muy antiguas y no cuentan con los parámetros establecidos en la Norma Ecuatoriana de Construcción. Por lo tanto, las estructuras construidas de adobe y ladrillo serían las más afectadas en caso de un sismo.

- Se obtuvo la curva de pérdidas agregadas para 25,000 y 50,000 años de sismicidad que engloba todas las tipologías estructurales, donde para un periodo de retorno de 475 años se tendrá una pérdida estructural de \$41'000,000 dólares para sismos de intensidad entre 0.6 y 0.76g.

6.2 RECOMENDACIONES

- Realizar una(s) curva(s) de recurrencia para el Centro Histórico de Quito y volver a correr el análisis de vulnerabilidad, ya que no se estudió a profundidad este apartado.
- Contabilizar las personas que habitan en las edificaciones estudiadas para realizar un análisis de riesgos de pérdidas humanas.
- Realizar un nuevo modelo de exposición donde se incluyan instituciones educativas, gubernamentales, culturales e históricas, debido a que estas estructuras le corresponden al 44.36% del total de edificaciones del CHQ y en algunas de ellas sus daños son invaluable e irreparables.
- Utilizar en este trabajo el último modelo de amenaza sísmica desarrollado por Yépez et al (2015) que no se pudo obtener debido a la no-colaboración por parte del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.
- Finalmente, el estudio preliminar de riesgo sísmico provee información valiosa para futuros proyectos que se encuentren dentro o alrededor del CHQ. Si por alguna razón se decide construir edificaciones en esa zona deben tomar en cuenta las normas de construcción estipuladas en la NEC 2015 y ser profesional al momento de tomar decisiones con respecto a la sismicidad del área.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alfonso, N. (2010). El Riesgo Sísmico en Quito: Análisis y Simulaciones.
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., Lamarque, G., Yopez, H., Mothes, P., Rolandone, F., Jarrin, P., and Quidelleur, X. (2012). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*, 33, 67-83. doi:10.1002/2012TC003224
- Alvarado, A., Ruiz, M., Mothes, P., Yepes, H., Segovia, M., Vaca, M., Ramos, C., Enríquez, W., Ponce, G., Jarrín, P., Aguilar, J., Acero, W., Vaca, S., Singaicho, J-C., Pacheco, D., & Córdova, A. (2018). Seismic, Volcanic, and Geodetic Networks in Ecuador: Building Capacity for Monitoring and Research. *XX, Seismological Research Letters*. doi:10.1785/0220170229
- Anil, K. & Rakesh, K. (2004). A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings. *International Association for Earthquake Engineering*. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/eqe.380>
- Baker, J. W. (2008). An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA).
- Beauval, C. Y.-M. (2014). Probabilistic Seismic-Hazard Assessment in Quito, Estimates and Uncertainties. *Seismological Research Letters*, 25-29. doi:10.1785/0220140036
- Beauval, C., Marinière, J., Laurendeau, A., Singaicho, J., Viracucha, C., Vallée, M., Maufroy, E., Mercerat, D., Yepes, H., Ruiz, M., & Alvarado, A. (2016). Comparison of observed ground-motion attenuation for the 2016/04/16 Mw7.8 Ecuador megathrust earthquake and its two largest aftershocks with existing ground-motion prediction equations.

- Beauval, C., Marinière, J., Yezpe, H., Audin, J., Nocquet, M., Alvarado, A., Baize, S., Aguilar, J., Singaicho, C., and Jomard, H.: (2018). A New Seismic Hazard Model for Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1443-1464. doi:10.1785/0120170259
- Beauval, C., Yezpe, H., Audin, L., Alvarado, A., Nocquet, J-M., Monelli, D., & Danciu, L. (2014). Probabilistic Seismic-Hazard Assessment in Quito, Estimates and Uncertainties. *Seismological Research Letters*, 85. doi:10.1785/0220140036
- Carrilo, J., & González, G. (2006). Influence of nonreinforced masonry in the inelastic behavior of concrete frames. 217-227.
- Chicaiza, M. (2017). Modelo de Exposición y Mapa de Vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17352/2/CD-7851.pdf>
- Cornell, C. A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 1583-1606.
- Dimaté, C., Drake, L., Yezpe, H., Ocola, L., Rendon, H., Grünthal, G., & Giardini, D. (1999). Seismic hazard assessment in the Northern Andes (PILOTO Project). *Annali di Geofisica*, 42.
- Garcia, S., Landín, J., Moreno, R., Chong, A., Mulas, M., Mite, M., & Cárdenas, N. (2018). Statistical analysis of the largest possible earthquake magnitudes on the Ecuadorian coast for selected return periods. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. doi:10.1080/17499518.2018.1542500

GEM. (2019). The OpenQuake-engine User Manual. *Global Earthquake Model (GEM)*

Open-Quake Manual for Engine version 3.7.1, 183 pages.

doi:10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.7.1

Gerstenberger, M. C., Marzocchi, W., Allen, T., Pagani, M., Adams, J., Danciu, L., Field, E.

H., Fujiwara, H., Luco, N., Ma, K-F., Meletti, C., & Petersen, M. D. (2020).

Probabilistic Seismic Hazard Analysis at Regional and National Scale: State of the

Art and Challenges. *American Geophysical Union*. doi:10.1029/2019RG000653

Global Earthquake Model Foundation. (2020). Obtenido de

<https://www.globalquakemodel.org/>

Global Earthquake Model Foundation. (2019). *GEM BUILDING TAXONOMY*. Obtenido de

Taxonomy Index: <http://localhost:8800/taxonomy/>

Hibsch, C., Alvarado, A. P., Yepes, H. A., Sébrier, M., & Pérez, V. H. (1996). Falla Activa

de Quito y Fuentes Sismogénicas Regionales: un Estudio del Riesgo Sísmico de

Quito (Ecuador) con el Análisis de los Sedimentos Cuaternarios. *Bull. Inst. fr. études*

andines, 359-388. Obtenido de

[https://www.researchgate.net/publication/26430957_Falla_activa_de_Quito_y_fuentes_sismogeneticas_regionales_un_estudio_del_riesgo_sismico_de_Quito_Ecuador_con_el_analisis_de_los_sedimentos_cuaternarios?enrichId=rgreq-](https://www.researchgate.net/publication/26430957_Falla_activa_de_Quito_y_fuentes_sismogeneticas_regionales_un_estudio_del_riesgo_sismico_de_Quito_Ecuador_con_el_analisis_de_los_sedimentos_cuaternarios?enrichId=rgreq-c9be50b5e5f0c8fbd9c7fdb442e957af-XXX&e)

[s_sismogeneticas_regionales_un_estudio_del_riesgo_sismico_de_Quito_Ecuador_co](https://www.researchgate.net/publication/26430957_Falla_activa_de_Quito_y_fuentes_sismogeneticas_regionales_un_estudio_del_riesgo_sismico_de_Quito_Ecuador_con_el_analisis_de_los_sedimentos_cuaternarios?enrichId=rgreq-c9be50b5e5f0c8fbd9c7fdb442e957af-XXX&e)

[n_el_analisis_de_los_sedimentos_cuaternarios?enrichId=rgreq-](https://www.researchgate.net/publication/26430957_Falla_activa_de_Quito_y_fuentes_sismogeneticas_regionales_un_estudio_del_riesgo_sismico_de_Quito_Ecuador_con_el_analisis_de_los_sedimentos_cuaternarios?enrichId=rgreq-c9be50b5e5f0c8fbd9c7fdb442e957af-XXX&e)

[c9be50b5e5f0c8fbd9c7fdb442e957af-XXX&e](https://www.researchgate.net/publication/26430957_Falla_activa_de_Quito_y_fuentes_sismogeneticas_regionales_un_estudio_del_riesgo_sismico_de_Quito_Ecuador_con_el_analisis_de_los_sedimentos_cuaternarios?enrichId=rgreq-c9be50b5e5f0c8fbd9c7fdb442e957af-XXX&e)

IngeCivil. (2020). Obtenido de Información relacionada a Ingeniería civil y Construcción:

<https://www.ingecivil.net/2018/08/10/la-mamposteria-reforzada/>

Laurendeau, A., Bonilla, L-F., Mercerat, D., Courboulex, F., Alvarado, A., Singaicho, J. C.,

Viracucha, C., Guéguen, P., & Bertrand, E. (2017). Seismic response of the basin of

Quito from continuous accelerometric records of RENAC-QUITO. *16^a World Conference on Earthquake*. Santiago de Chile.

Legrand, D. C. (2002). Stress tensor analysis of the 1998-1999 tectonic swarm of northern Quito related to the volcanic swarm of Guagua Pichincha volcano, Ecuador. *Tectonophysics*, 15-36.

Martins, L. & Silva, V. (2020). Development of a fragility and vulnerability model for global seismic risk analyses. *Bull Earthquake Eng.* doi:<https://doi.org/10.1007/s10518-020-00885-1>

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2011). *PLAN METROPOLITANO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL 2012-2022*. Obtenido de http://sthv.quito.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=20

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2015). *PLAN METROPOLITANO DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL*. Obtenido de <http://www.aeropuertoquito.com/transparencia/anexos/planOrdenamientoT>

Nocquet, J.-M. J.-C. (2016). Supercycle at the Ecuadorian subduction zone revealed after the 2016 Pedernales earthquake. *Nature Geoscience*. doi:10.1038/NGEO2864

Pagani, M., Johnson, K., & Palaez, J.G. (2019). Modelling subduction sources for probabilistic seismic hazard. *Geological Society, London, Special Publications*. doi:10.1144/SP501-2019-120

Ribadeneira, F. S. (2018). Estudio de impacto ambiental de la primera línea del metro de Quito.

- Rivadeneria, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007). *Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador* (Vol. 1). Quito-Ecuador: Corporación Editora Nacional.
- Sameh, A. (2018). Seismic vulnerability evaluation of existing R.C. buildings. *HBRC Journal*, 14:2, 189-197. doi:10.1016/j.hbrcj.2016.09.002
- SARA Wiki. (2020). *City scenarios*. Obtenido de <https://sara.openquake.org/start>
- Silva, V. (2016). Critical Issues in Earthquake Scenario Loss Modeling. *Journal of Earthquake Engineering*, 20:8, 1322-1341. doi:10.1080/13632469.2016.1138172
- Vaca, S., Vallée, M., Nocquet, J.-M., & Alvarado, A. (2019). Active deformation in Ecuador enlightened by a new waveform-based catalog of earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences*, 449-461. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.05.017>
- Valcárcel, J. A., Mora, M. G., Cardona, O. D., Pujades, L. G., Barnat, A. H., & Bernal, G. A. (2013). Methodology and applications for the benefit cost analysis of the seismic risk reduction in building portfolios at broadscale. *NatHazards*, 69:845-868. doi:10.1007/s11069-013-0739-2
- Vamvatsikos, D. (2001). Incremental dynamic analysis. *International Association for Earthquake Engineering*. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- Villacís, C. T. (1997). Use of seismic microzoning for risk management in Quito, Ecuador. *Engineering Geology*, 63-70.
- Yépez, F. (2012). Últimos avances en la evaluación del riesgo sísmico de Quito y futuros proyectos de mitigación.

ANEXOS A: Parroquias urbanas del DMQ

Fuente: Secretaría General de Planificación, 2019

ANEXOS C: Archivos de configuración para evento-based PSHA

```

job_hazard: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
[general]
description = Hazard Quito Centro Historico (time=1, ses=1000, branches=50)
calculation_mode = event_based

[site_params]
site_model_file = Quito_CH_site_conditions.csv

[erf]
rupture_mesh_spacing = 5
complex_fault_mesh_spacing = 10
width_of_mfd_bin = 0.1
area_source_discretization = 10.0

[logic_trees]
source_model_logic_tree_file = source_model_logic_tree.xml
gsim_logic_tree_file = gmpe_logic_tree.xml

[hazard_calculation]
ses_seed = 1
random_seed = 1
truncation_level = 3
investigation_time = 1
number_of_logic_tree_samples = 50
ses_per_logic_tree_path = 1000
max_potential_paths = 5

maximum_distance = {'Subduction Interface': 300., 'Active Shallow Crust': 300., 'default': 300.}
#minimum_magnitude = {'default': 5.5, "Subduction IntraSlab": 6.5, "Active Shallow Crust": 5.0}

intensity_measure_types = PGA, SA(0.3), SA(0.6), SA(1.0)

minimum_intensity = {"PGA": 0.05, "SA(0.3)": 0.10, "SA(0.6)": 0.05, "SA(1.0)": 0.05}

[hazard_outputs]
ground_motion_fields = true

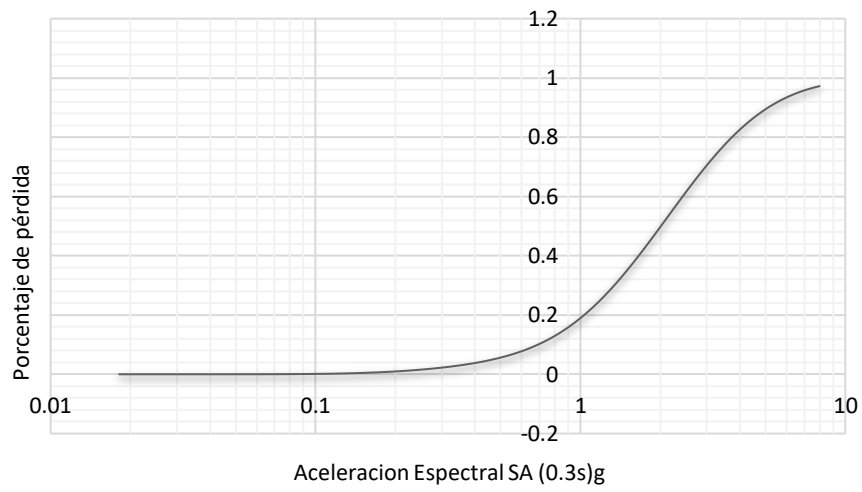
```

Elaborado por Jadira Llugsha

ANEXOS D: Tipología estructural según el GEM y su conversión.

taxonomy	conversion	weight
CR+CIP/LFINF+DNO+RMN:2-4	CR_LFINF-DUL_H3	1
CR+CIP/LFINF+DNO+RMT1:2-4	CR_LFINF-DUL_H3	1
CR+CIP/LFINF+DNO+RMT6:2-3	CR_LFINF-DUL_H3	1
CR+CIP/LFINF+DUC+RMN:1-3	CR_LFINF-DUM_H2	1
CR+CIP/LFINF+DUC+RMN:4-7	CR_LFINF-DUM_H6	1
CR+CIP/LFINF+DUC+RMT1:1-3	CR_LFINF-DUM_H2	1
CR+CIP/LFINF+DUC+RMT1:4-6	CR_LFINF-DUM_H5	1
CR+CIP/LFINF+DUC+RMT6:2-3	CR_LFINF-DUM_H3	1
CR+CIP/LFINF+DUC+RMT6:4-6	CR_LFINF-DUM_H5	1
CR+CIP/LFLSINF+DUC+RMN:3-5	CR_LFINF-DUM_H5	1
CR+CIP/LFLSINF+DUC+RMT1:4-5	CR_LFINF-DUM_H5	1
CR+CIP/LWAL+DNO+RMT1:1	CR_LWAL-DUL_H1	1
CR+CIP/LWAL+DNO+RMT6:1	CR_LWAL-DUL_H1	1
CR+CIP/LWAL+DUC+RMN:4	CR_LFM-DUM_H4	1
CR+CIP/LWAL+DUC+RMT1:3	CR_LFM-DUM_H3	1
MUR+ADO/LWAL+DNO+RMN:1-2	MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2	1
MUR+ADO/LWAL+DNO+RMN:4-5	MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3	1
MUR+ADO/LWAL+DNO+RMT1:1-2	MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2	1
MUR+ADO/LWAL+DNO+RMT1:3-4	MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3	1
MUR+ADO/LWAL+DNO+RMT6:1-2	MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2	1
MUR+ADO/LWAL+DNO+RMT6:3-4	MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3	1
MUR+CLBRS/LWAL+DNO+RMN:1-2	MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H1	1
MUR+CLBRS/LWAL+DNO+RMN:3-4	MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3	1
MUR+CLBRS/LWAL+DNO+RMT1:1-2	MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H1	1
MUR+CLBRS/LWAL+DNO+RMT1:3-4	MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3	1
MUR+CLBRS/LWAL+DNO+RMT6:1-2	MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H1	1
MUR+CLBRS/LWAL+DNO+RMT6:3-4	MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3	1

Fuente: GEM, 2020

ANEXOS E: Curvas de vulnerabilidad y estructuras características

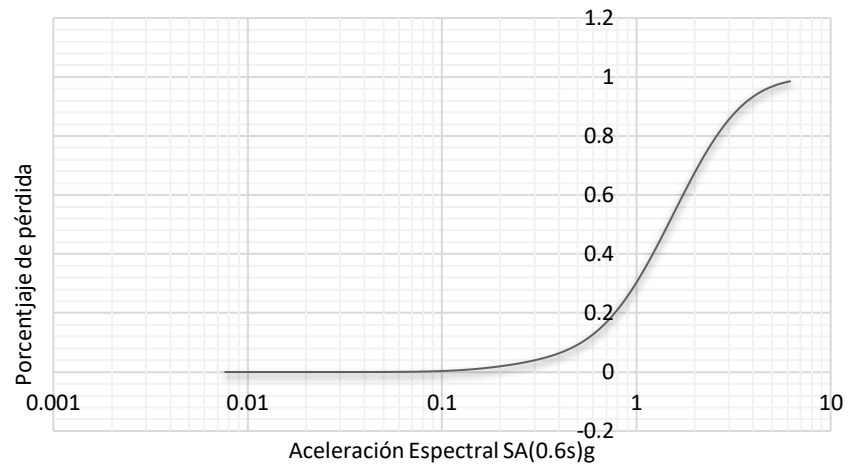
Tipología estructural CR_LFINF-DUL_H3

Fuente: Martins y Silva, 2020



Tipología estructural característica de CR_LFINF-DUL_H3

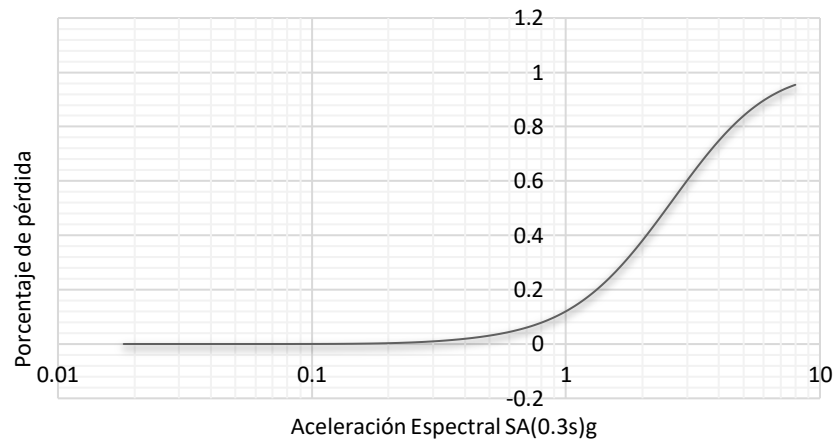
Elaborado por Jadira Llugsha



Tipología estructural CR_LFINF-DUM_H5
Fuente: Martins y Silva, 2020



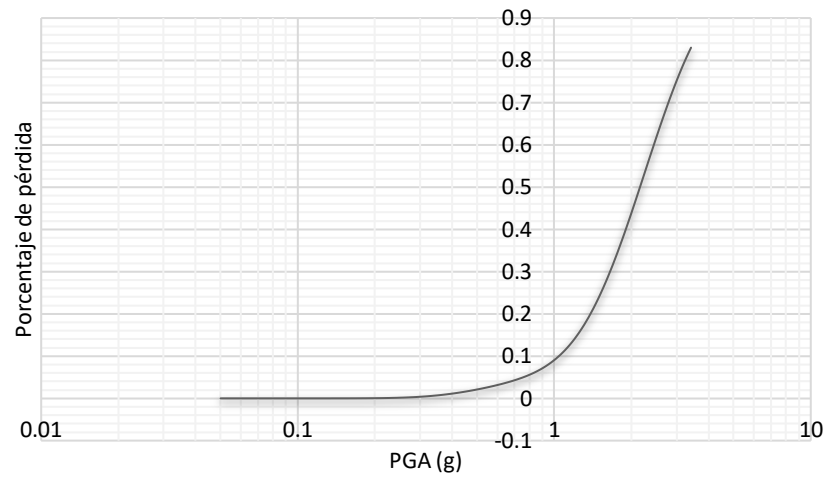
Tipología estructural característica de CR_LFINF-DUM_H5
Elaborado por Jadira Llugsha



Tipología estructural CR_LFINF-DUM_H3
Fuente: Martins y Silva, 2020



Tipología estructural característica de CR_LFINF-DUM_H3
Elaborado por Jadira Llugsha

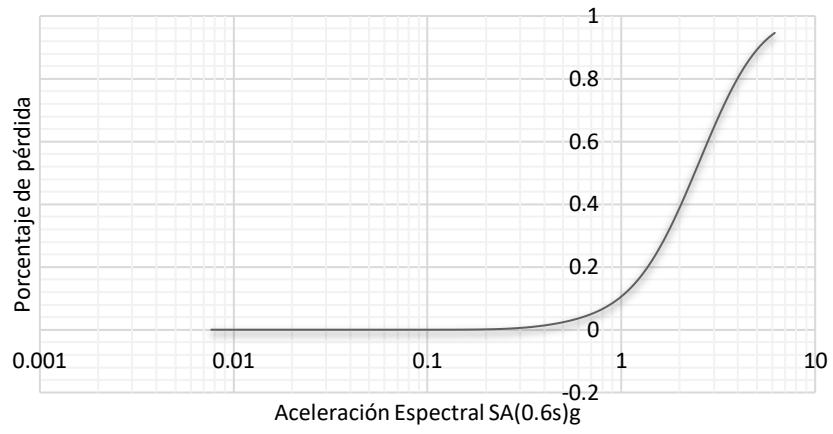


Tipología estructural CR_LWAL-DUL_H1

Fuente: Martins y Silva, 2020



Tipología estructural característica de CR_LWAL-DUL_H1
Elaborado por Jadira Llugsha



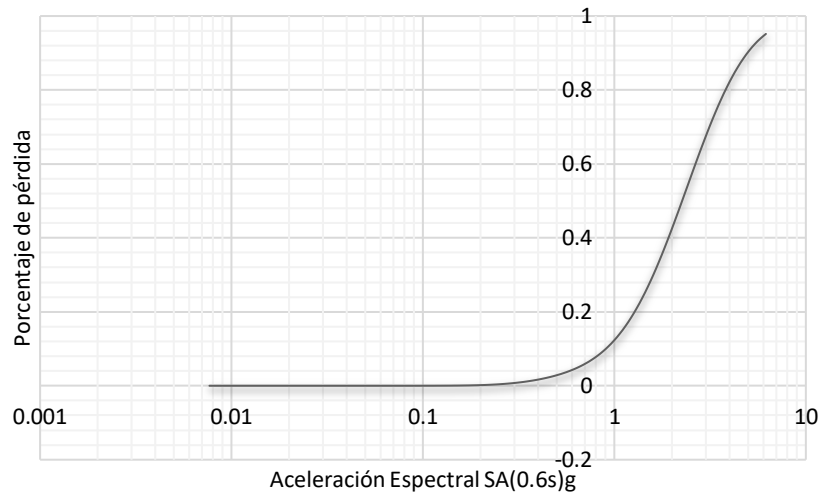
Tipología estructural CR_LFM-DUM_H4

Fuente: Martins y Silva, 2020



Tipología estructural característica de CR_LFM-DUM_H4

Elaborado por Jadira Llugsha



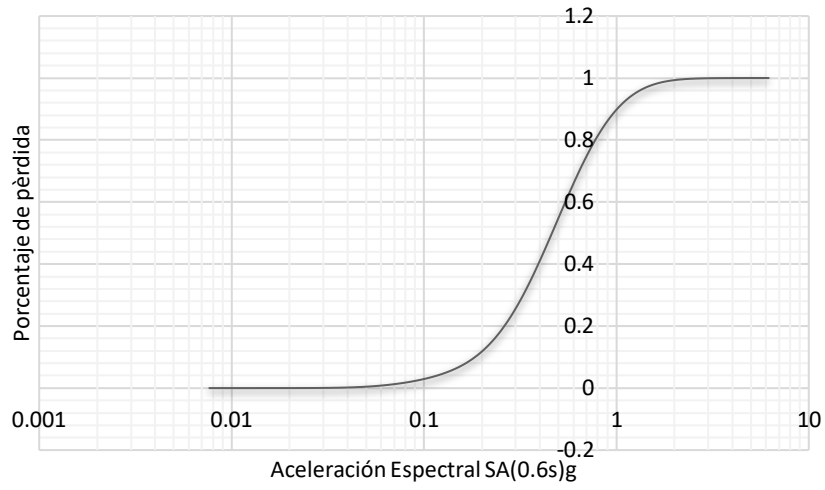
Tipología estructural CR_LFM-DUM_H3

Fuente: Martins y Silva, 2020



Tipología estructural característica de CR_LFM-DUM_H3

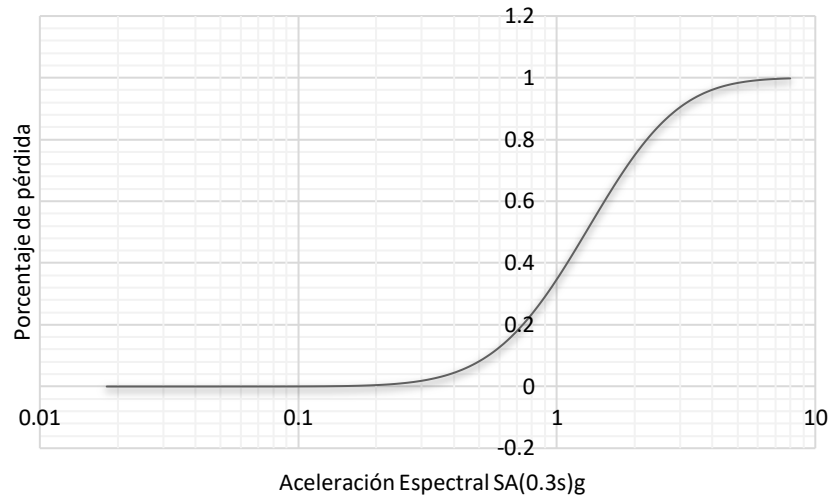
Elaborado por Jadira Llugsha



Tipología estructural MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3
Fuente: Martins y Silva, 2020



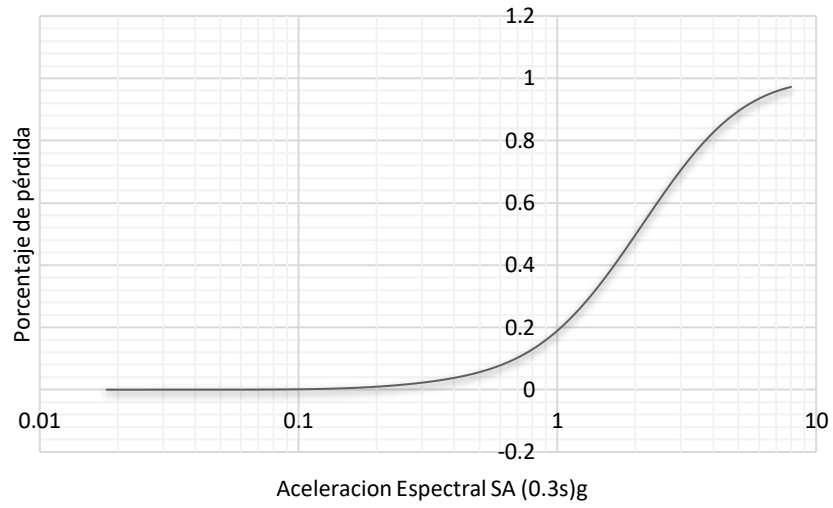
Tipología estructural característica de MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3
Elaborado por Jadira Llugsha



Tipología estructural MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H1
Fuente: Martins y Silva, 2020



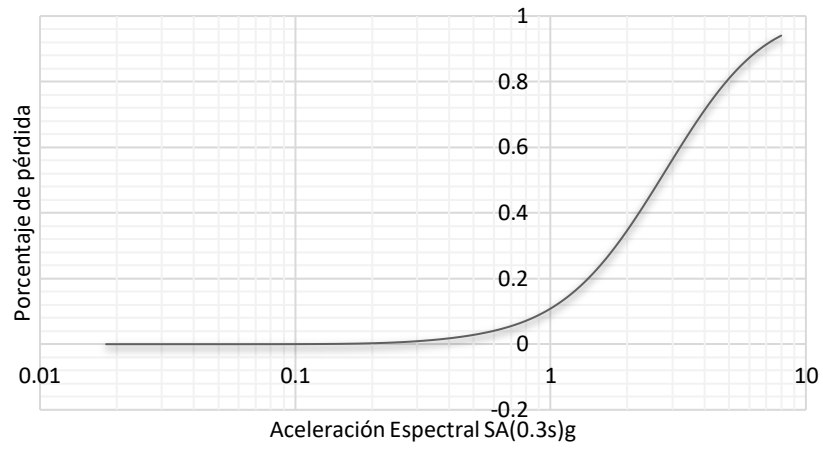
Tipología estructural característica de MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H1
Elaborado por Jadira Llugsha



Tipología estructural CR_LFINF-DUL_H3
Fuente: Martins y Silva, 2020



Tipología estructural característica de CR_LFINF-DUL_H3
Elaborado por Jadira Llugsha



Tipología estructural CR_LFINF-DUM_H2

Fuente: Martins y Silva, 2020



Tipología estructural característica de CR_LFINF-DUM_H2
Elaborado por Jadira Llugsha

ANEXOS F: Archivo de configuración para evento-based risk PSHA

```
job_risk: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
[general]
description = Risk Ecuador (time=1, ses=1000, branches=50)
calculation_mode = event_based_risk
random_seed = 125

[exposure]
exposure_file = exposure_quito_ch_v1.0.xml
taxonomy_mapping_csv = ch_taxonomy_mapping.csv
asset_hazard_distance = 250

[vulnerability]
structural_vulnerability_file = Quito_CH_vulnerability_v1.0.xml

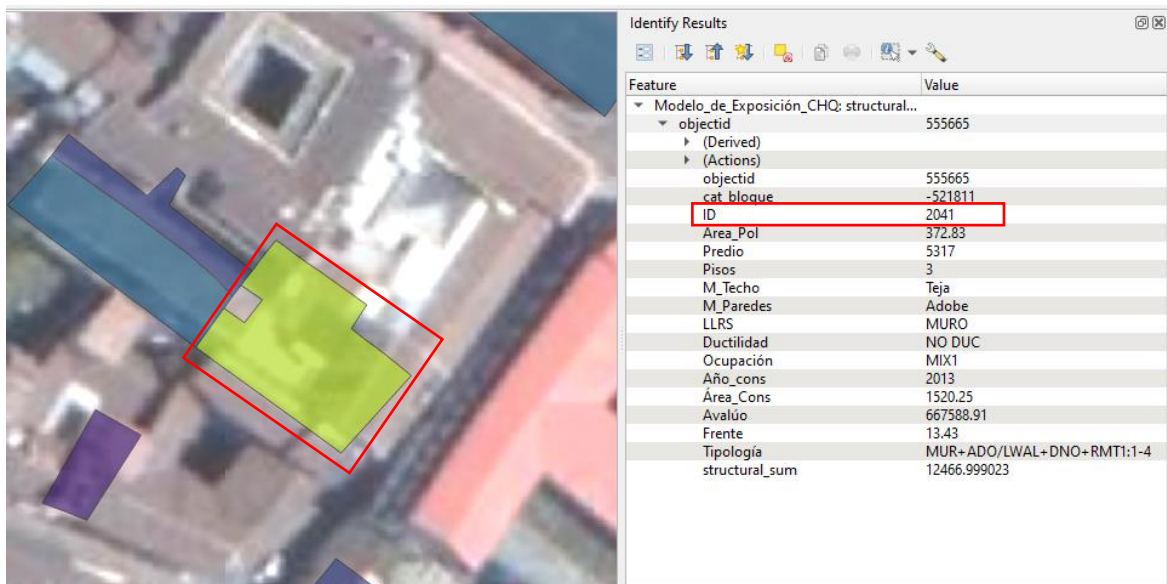
[risk_calculation]
risk_investigation_time = 1
```

Elaborado por Jadira Llugsha

ANEXOS G: Edificaciones con mayor pérdida estructural (USD)



Elaborado por Jadira Llugsha



Elaborado por Jadira Llugsha