

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 de Global Earthquake Model para escenario del sismo del 11 de agosto de 1990 de Pomasqui-Ecuador.

Emily Fernanda Cabay Rodríguez

Ingeniería Civil

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

Quito, 18 de diciembre de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniarías

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 de Global Earthquake Model para un escenario del sismo del 11 de agosto de 1990 de Pomasqui-Ecuador.

Emily Fernanda Cabay Rodríguez

Nombre del profesor, Título académico

Juan Carlos Pantoja Moyano,

M.Sc. en Ingeniería Civil

Quito, 18 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: Emily Fernanda Cabay Rodríguez

Código: 00136880

Cédula de identidad: 1720904570

Lugar y fecha: Quito, 18 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 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UNPUBLISHED DOCUMENT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>.

RESUMEN

En el siguiente trabajo, se presenta el estudio de riesgo sísmico para el Centro Histórico de Quito, simulado en base al sismo del 11 de agosto de 1990 de Pomasqui-Ecuador. En el estudio se analiza el riesgo sísmico a partir de tres componentes: amenaza, exposición y vulnerabilidad.

El estudio de amenaza sísmica se realiza recopilando información histórica del sismo de 11 de agosto de 1990 cuya magnitud fue de 5 Mw. Para obtener las aceleraciones de terreno se utiliza la ecuación predicción de movimiento de terreno (GMPEs) incorporada en el software de OpenQuake: AkkarBommer2010. Con estos parámetros se obtuvieron aceleraciones de 0.05g para el modelo de mediana en la zona de estudio.

El modelo de exposición utiliza la información contenida en las bases de datos externas del Plan de Uso y Ocupación del Suelo de Quito y el Sistema Metropolitano de Catastro. El número total de edificaciones que se recopilaron fueron de 1183 estructuras en donde se determinaron sus materiales de construcción, año de construcción, avalúo, sistema de resistencia lateral, ductilidad y números de pisos al final del análisis se identificaron las 12 tipologías estructurales encontradas en la zona de estudio. Para el estudio de vulnerabilidad se asigna a cada una de las 12 tipologías estructurales una función de vulnerabilidad para las tipologías realizadas por Martins y Silva (2020) según la taxonomía del Global Earthquake Model (GEM).

Utilizando la herramienta de código abierta de OpenQuake desarrollada por GEM, se realiza un análisis de riesgo sísmico para el Centro Histórico de Quito teniendo en cuenta el evento puntual de análisis en donde se obtiene como resultado un mapa de pérdidas económicas estructurales y el porcentaje de pérdida económica por cada tipología estructural. En donde se obtiene que las pérdidas totales se estiman en 288,283.25 USD en el Centro Histórico de Quito, cifra que supera en más de 4.5 veces las pérdidas del sismo de Pomasqui de 1990. La tipología con mayor porcentaje de pérdidas fue edificaciones construidas con muros de adobe con un sistema de resistencia lateral de mampostería no dúctil de 1 y 2 pisos con un valor del 36.34%.

Palabras clave: Peligro sísmico, Amenaza sísmica, Vulnerabilidad sísmica, Curvas de fragilidad, Exposición sísmica, Centro Histórico de Quito.

ABSTRACT

The following research presents the seismic risk study for the Historic Center of Quito for a seismic scenario based on the Pomasqui earthquake of August 11, 1990 based on simulation of the earthquake of August 11, 1990 in Pomasqui-Ecuador. The study analyzes the seismic risk from three components: hazard, exposure, and vulnerability.

The seismic hazard assessment is development by collecting historical information on the earthquake of August 11, 1990, with a magnitude of 5Mw. To obtain the ground accelerations, the ground motion prediction equation (GMPEs) incorporated in the OpenQuake software is used: AkkarBommer2010. With these parameters, accelerations of 0.05g were obtained using the simulation by median calculation.

The exposure model uses the information contained in the external databases of Plan de Uso y Ocupación del Suelo de Quito and the Sistema Metropolitano de Catastro. The total number of buildings that were collected were 1183 structures where their construction materials, year of construction, building value, lateral resistance system, ductility and number of floors were determined. Using these parameters 12 structural typologies were found in the study zone. For the vulnerability study, each of the 12 structural typologies were assigned a vulnerability function for the typologies developed by Martins and Silva (2020) according to the Global Earthquake Model (GEM) taxonomy.

Using the OpenQuake open source tool developed by GEM, a seismic risk analysis is developed for the Historic Center of Quito, taking into account the specific analysis event where a map of structural economic losses and the loss percentage is obtained as a result. Where the total losses are estimated at 288,283.25 USD in the Historic Center of Quito, a value that exceeds by more than 4.5 times the losses of the 1990 Pomasqui earthquake. The typology with the highest percentage of losses was buildings built with walls of adobe with a 1 and 2 story non-ductile masonry lateral resistance system with a value of 36.34%.

Key words: Seismic risk, Seismic hazard, Seismic vulnerability, Vulnerability curves, Seismic exposure, Historic Center of Quito.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a:

Mis padres: Ciro y Cecilia que son mi pilar fundamental en mi vida, por su apoyo incondicional, por sus consejos y por confiar en mí y ayudarme a alcanzar mis objetivos.

Mis hermanos: Pamela, Martín y Paulo, por siempre estar presentes y por ser mis compañeros en el camino de la vida y a quienes les agradezco por tantos momentos que hemos compartido juntos.

AGRADECIMIENTOS

Mis profundos agradecimientos a:

Mis padres quienes me han guiado durante todos mis años de educación. Me han brindado dedicación, cariño y consejos durante todo mi camino en mi carrera universitaria.

Mis compañeros con los que he compartido mi carrera universitaria, de quienes he aprendido y he compartido varios años en nuestro camino hacia cumplir nuestras metas.

La Universidad San Francisco de Quito y el Departamento de Ingeniería Civil, por su excelente calidad de educación e integridad que han inculcado en mi persona.

Alejandro Calderón Carpio, Physical Risk Enginner de Global Earthquake Model Foundation, por la asesoría y capacitación, facilitada durante mi Investigación.

Mi tutor Ing. Juan Carlos Pantoja, quien ha brindado un constante apoyo e interés en el desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Objetivos.....	14
1.1.1. Objetivo General	14
1.1.2. Objetivos Específicos.....	14
1.2. Justificación.....	15
1.3. OpenQuake Global Earthquake Model.....	15
2. CAPITULO II: MODELO DE EXPOSICIÓN EN EL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO.....	16
2.1. Información geopolítica de Quito.....	16
2.2. Información general del Centro Histórico de Quito	16
2.2.1. Información geopolítica	16
2.2.2. Características estructurales del Centro Histórico	17
2.3. Modelo de Exposición para el Centro Histórico de Quito	18
2.3.1. Metodología	18
2.3.2. Delimitación del área de estudio para el riesgo sísmico del CHQ.....	19
2.3.3. Resultados según su Ocupación	20
2.3.4. Resultados según Material de construcción de la pared.....	21
2.3.5. Resultados según Número de Pisos.....	22
2.3.6. Resultados según Sistema Estructural de Resistencia Lateral	23
3. CAPITULO III: ESTUDIO DE AMENAZA SÍSMICA DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO	25
3.1. Fuente sismogénica del Ecuador	25
3.2. Fuente sismogénica de Quito	26
3.3. Evento puntual: Sismo de 11 agosto 1990 de Pomasqui	28
3.3.1. Descripción de las edificaciones afectadas en el sismo de 11 de agosto de 1990..	28
3.3.2. Modelación del movimiento del terreno para evento sísmico puntual.....	29
3.3.2.1. Parámetros de ruptura Del sismo de 11 de agosto de 1990.....	29
3.3.2.2. Archivo de configuración	30
3.3.2.3. Parámetros de cálculo para el modelo de movimiento de terreno.....	32
3.3.2.4. Modelo de la mediana del movimiento del terreno.....	33
3.3.2.5. Resultados de modelos de movimiento de terreno por cálculo de mediana.....	34
3.3.2.6. Modelo de variabilidad del movimiento del terreno.....	36
3.3.2.7. Resultados de modelos de movimiento de terreno por cálculo de variabilidad ..	37
3.4. PSHA (Probabilistic seismic hazard assessment) en CHQ.....	41

3.4.1.	PSHA (Probabilistic seismic hazard assessment).....	41
3.4.2.	Datos de configuración para PSHA del CHQ	41
3.4.3.	Mapa de amenaza sísmica en CHQ	43
4.	CAPITULO IV: VULNERABILIDAD	45
4.1.	Curvas de Fragilidad.....	45
4.2.	Curvas de Vulnerabilidad.....	45
4.3.	Metodología Push Over	46
4.4.	Metodología del desarrollo de curvas de vulnerabilidad por Martins y Silva.....	46
5.	CAPITULO V: ESTUDIO DE RIESGO SISMICO DEL CENTRO HISTORICO DE QUITO	47
5.1.	Riesgo sísmico	47
5.2.	Riesgo sísmico en Quito.....	47
5.3.	Configuración de riesgo sísmico del CHQ en OpenQuake	48
5.4.	Mapa de pérdidas estructurales por edificio.....	49
5.5.	Tipologías constructivas de mayor pérdida	50
5.6.	Tipología constructiva de menor pérdida.	53
5.7.	Comparación de pérdidas	55
	CONCLUSIONES	56
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
	ANEXO A: RUPTURA EN EL EPICENTRO DE FALLA TRUNCAMIENTO 0. GMPE AKKARBOMMER2010	61
	ANEXO B: RUPTURA EN EL EPICENTRO DE FALLA TRUNCAMIENTO 0. GMPE BOOREATKINSON2008	62
	ANEXO C: RUPTURA EN EL EPICENTRO DE FALLA TRUNCAMIENTO 0. GMPE ZHAOETAL2006ASC	63
	ANEXO D: RUPTURA EN EL EPICENTRO DE FALLA TRUNCAMIENTO 3. GMPE AKKARBOMMER2010	64

ANEXO E: RUPTURA EN EL EPICENTRO DE FALLA TRUNCAMIENTO 3. GMPE BOOREATKINSON2008	65
ANEXO F: RUPTURA EN EL EPICENTRO DE FALLA TRUNCAMIENTO 3. GMPE ZHAOETAL2006ASC	66
ANEXO G: RUPTURA EN EL CHQ TRUNCAMIENTO 0. GMPE AKKARBOMMER2010	67
ANEXO H: RUPTURA EN EL CHQ TRUNCAMIENTO 0. GMPE BOOREATKINSON2008	68
ANEXO I: RUPTURA EN EL CHQ TRUNCAMIENTO 0. GMPE ZHAOETAL2006ASC	69
ANEXO J: RUPTURA EN EL CHQ TRUNCAMIENTO 3. GMPE AKKARBOMMER2010	70
ANEXO K: RUPTURA EN EL CHQ TRUNCAMIENTO 3. GMPE BOOREATKINSON2008	71
ANEXO L: RUPTURA EN EL CHQ TRUNCAMIENTO 3. GMPE ZHAOETAL2006ASC	72
ANEXO M: PÉRDIDAS ESTRUCTURALES BOOREATKINSON2008	73
ANEXO N: PÉRDIDAS ESTRUCTURALES ZHAOETAL2006ASC	74
ANEXO O: CURVAS DE VULNERABILIDAD I.....	75
ANEXO P: CURVAS DE VULNERABILIDAD II.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros para definir la ruptura del sismo del 11 de agosto de 1990 (Alvarado et al, 2014).....	30
Tabla 2. Coordenadas de zona de Estudio del CHQ para modelo de movimiento de suelo	31
Tabla 3. Condiciones de sitio	32
Tabla 4. Parámetros para modelar la mediana de aceleraciones del terreno	33
Tabla 5. Parámetros para modelar la variabilidad de aceleraciones del terreno.....	37
Tabla 6. Errores porcentuales de intensidades para los GMPE.....	38
Tabla 7. Pérdidas totales esperadas [USD].....	50
Tabla 8. Designación de tipologías.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Áreas de Intervención en la Encuesta Multipropósito 2016. (Instituto de la Ciudad, 2017).....	17
Figura 2. Bases de datos externas.....	19
Figura 3. Delimitación por manzanas del Centro Histórico de Quito	19
Figura 4. Viviendas Según la Ocupación	21
Figura 5. Viviendas Según el Material de Construcción	22
Figura 6. Viviendas Según el Número de Pisos	23
Figura 7. Viviendas Según sistema de resistencia lateral.....	24
Figura 8. Mapa tectónico de Ecuador. (Alvarado et al, 2016).....	26
Figura 9. Mapa tectónico de la región de Quito y sus fallas. (Alvarado et al, 2014)	27
Figura 10. Ángulos de ruptura (GEM, 2020)	29
Figura 11. Clasificación del tipo de suelo en Quito (Aguiar, Rivas-Medina, Caiza, & Quizanga, 2017)	31
Figura 12. Mediana de aceleración de terreno en la falla de ruptura, unidades en [g].	34
Figura 13. Mediana de aceleración de terreno sobre área de estudio del CHQ, unidades en [g].	35
Figura 14. Predicción por mediana y por variabilidad (GEM, 2020).....	36
Figura 15. Variabilidad de aceleración de terreno en la falla de ruptura, unidades en [g].	37
Figura 16. Rangos de aceleración de terreno [g] por variabilidad para el modelo en la falla de ruptura.....	38
Figura 17. Rangos de aceleración de terreno [g] por mediana para modelo en la falla de ruptura.....	38
Figura 18. Variabilidad de aceleraciones sobre área de estudio del CHQ, unidades en [g]....	39
Figura 19. Rangos de aceleración de terreno [g] por variabilidad para el CHQ	39
Figura 20. Calles de la zona con predicciones de intensidades entre 0.08-0.09 [g].....	40
Figura 21. Mapa de amenaza sísmica en el CHQ (PSHA), unidades en [g]	43
Figura 22. Pérdidas estructurales en USD en el CHQ.....	49
Figura 23. Pérdidas estructurales según la tipología	51
Figura 24. Mapa de Tipologías de las edificaciones del CHQ	52
Figura 25. Curva de vulnerabilidad de MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2 (Martins & Silva, 2020).....	52
Figura 26. Vivienda de tipología 11	53
Figura 27. Curva de vulnerabilidad de CR_LFM-DUM_H4 (Martins & Silva, 2020).....	54
Figura 28. Vivienda de tipología CR_LFM-DUM_H4	54

1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

Ecuador se ha caracterizado por ser un país clasificado como zona de alto riesgo sísmico debido a los sismos recurrentes que ocurren en consecuencia de la subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana. Quito es actualmente la ciudad de mayor densidad poblacional y tiene una amplia historia de actividad sísmica que datan de la época colonial hasta la actualidad con sismos como los ocurridos en 1923, 1938 y 1990.

El Centro Histórico de Quito (CHQ) es uno de los patrimonios culturales más importantes del mundo y, por lo tanto, el análisis de su riesgo sísmico es necesario para tener un contexto de cómo afecta un evento puntual en la zona de estudio. Por medio de este proyecto se obtiene un análisis preliminar de riesgo sísmico incorporando los estudios de amenaza sísmica, el modelo de exposición y modelos de vulnerabilidad que permiten obtener un mapa de pérdidas estructurales en las edificaciones del CHQ.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Realizar el estudio preliminar de riesgo sísmico del Centro Histórico de Quito aplicando las metodologías de Global Earthquake Model (GEM).

1.1.2. Objetivos Específicos

- Consultar sobre información preexistente de análisis de riesgo sísmico en Ecuador y en la ciudad de Quito.
- Organizar la información disponible del Centro Histórico de Quito que se encuentra en bases de datos (ARCGIS y Sistema Metropolitano de Catastro) para completar el modelo de exposición.

- Estudiar el modelo de amenaza sísmica para la zona de estudio en el área del Centro Histórico de Quito proveído por GEM.
- Obtener los modelos de movimiento de terreno para las tres ecuaciones de atenuación de movimiento: AkkarBommer2010, BooreAtkinson2008 y ZhaoEtAl2006Asc.
- Identificar las tipologías estructurales presentes en el Centro histórico de Quito según la nomenclatura del Global Earthquake Model.
- Estudiar las curvas de fragilidad y vulnerabilidad presentes en las bases de datos del GEM y asignarlas al modelo de exposición generado.
- Obtener un mapa de pérdidas estructurales en el Centro Histórico de Quito para el escenario del 11 agosto de 1990 de Pomasqui.

1.2. Justificación

En el estudio de riesgo sísmico que se realiza por eventos estocásticos se analizan varios eventos con una probabilidad de ocurrir en el Centro Histórico de Quito. La intención de este proyecto es el de analizar un evento puntual junto sus datos de pérdidas estructurales reales y compararlos con los resultados por análisis de eventos estocásticos. A partir de esta premisa se pretende establecer si el modelo de riesgo analizado está prediciendo correctamente los datos y validar el estudio de riesgo sísmico para varios eventos.

1.3. OpenQuake Global Earthquake Model

El software utilizado para este estudio de riesgo sísmico es OpenQuake el cual es un programa de fuente abierta desarrollado para el modelado de riesgo y amenaza sísmica. Su desarrollo se llevó a cabo por medio del trabajo colaborativo entre varios integrantes del equipo de Global Earthquake Model. Entre algunas de sus aplicaciones consta el cálculo de pérdidas humanas y económicas a partir de un escenario o de cálculos probabilísticos de varios eventos posibles.

2. CAPITULO II: MODELO DE EXPOSICIÓN EN EL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO

2.1. Información geopolítica de Quito

El Distrito Metropolitano de Quito se divide en 65 parroquias (33 rurales y 32 urbanas) con un área de superficie de 4.235.2 km². En Quito existen aproximadamente 763.719 viviendas de las cuales un porcentaje del 60% son construcciones informales (Municipio de Quito, 2012).

2.2. Información general del Centro Histórico de Quito

2.2.1. Información geopolítica

La división geopolítica del Centro Histórico se define por las parroquias Gonzales Suarez y barrios característicos como Alameda, San Juan, La Chilena, El Tejar, La Loma, La Tola y San Marcos. Su fundación data del siglo XVI en la fecha del 6 de diciembre de 1534 y es considerado uno de los patrimonios que mejor ha conservado su valor histórico (Hanna , 2017).

Según un estudio realizado en el año 2016 por el Instituto de la Ciudad la población en el Centro Histórico de Quito se conforma de 15902 habitantes distribuidos en las zonas de área de intervención: Eje 24 de mayo, Zona envolvente oriental, Zona envolvente occidental, Núcleo central (Instituto de la Ciudad, 2017). Es preciso señalar que esta población también se encuentra en constante decrecimiento debido a la migración hacia otras zonas de la ciudad.

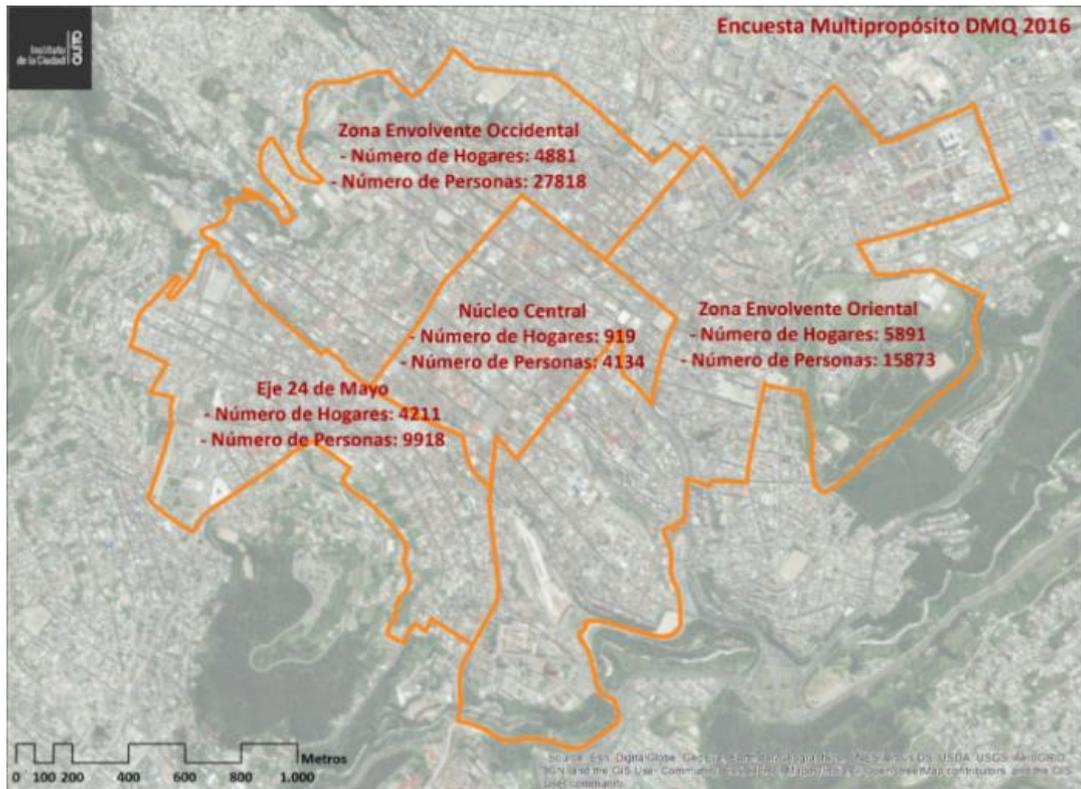


Figura 1. Áreas de Intervención en la Encuesta Multipropósito 2016. (Instituto de la Ciudad, 2017)

2.2.2. Características estructurales del Centro Histórico

A partir del estudio realizado por el Instituto de la Ciudad se determina que las edificaciones del Centro Histórico se encuentran conformadas por estructuras en un 50% de adobe o tapial, seguido por un 30% de ladrillo o bloque y en menor porcentaje con un 10% de edificaciones hechas a base de Hormigón. Según INEC, el porcentaje de viviendas que se distribuyen en casas unifamiliares es del 23%, viviendas de cuartos de inquilinato y departamentos corresponden al 34% y 43% correspondientemente (Instituto de la Ciudad, 2016).

El Centro Histórico es declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO el 8 de septiembre de 1978. Efectivamente, este hecho fue el impulsor de varios proyectos de preservación de las edificaciones, más se recalca que la inversión para la restauración se ha visto más involucrada en las edificaciones de carácter cultural o institucional. Según el

arquitecto Lara, las construcciones civiles, a comparación, solo han recibido un 13.75% de intervenciones a diferencia del 86.25% que han recibido los inmuebles como iglesias, templos, museos y plazas (2015).

2.3. Modelo de Exposición para el Centro Histórico de Quito

El modelo de exposición se define como todo elemento que se encuentra expuesto a una amenaza. Esto incluye sus habitantes, las edificaciones, así como sus contenidos. Para este estudio se han definido los siguientes atributos para cada edificación en el área de análisis: tipo de ocupación, avalúo, longitud, latitud, el material de construcción, el sistema estructural, el número de pisos y el año de construcción, longitud del frente, área de construcción y ductilidad.

2.3.1. Metodología

Para la recopilación de la información necesaria para el modelo de exposición fue necesario el uso de bases de datos externas como: Plan de Uso y Ocupación del Suelo de Quito que permite obtener el número de predio de la edificación y el Sistema Metropolitano de Catastro que provee información de la cédula catastral. Como herramienta extra y para obtener una mejor perspectiva de las construcciones también fue necesario el uso de Google Earth.

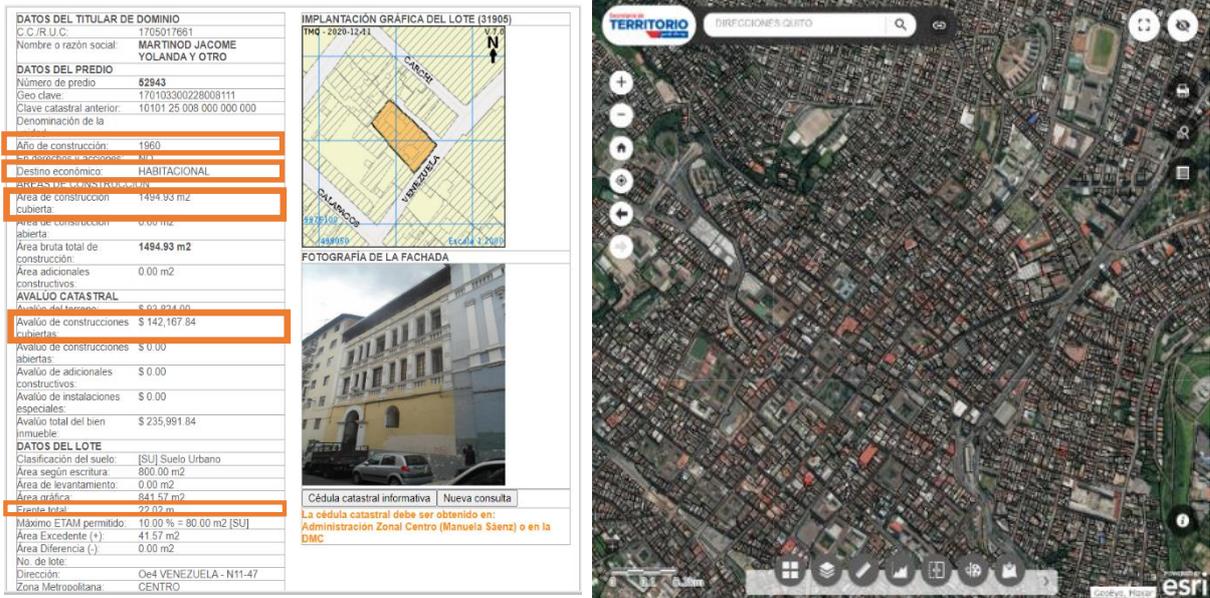


Figura 2. Bases de datos externas

2.3.2. Delimitación del área de estudio para el riesgo sísmico del CHQ

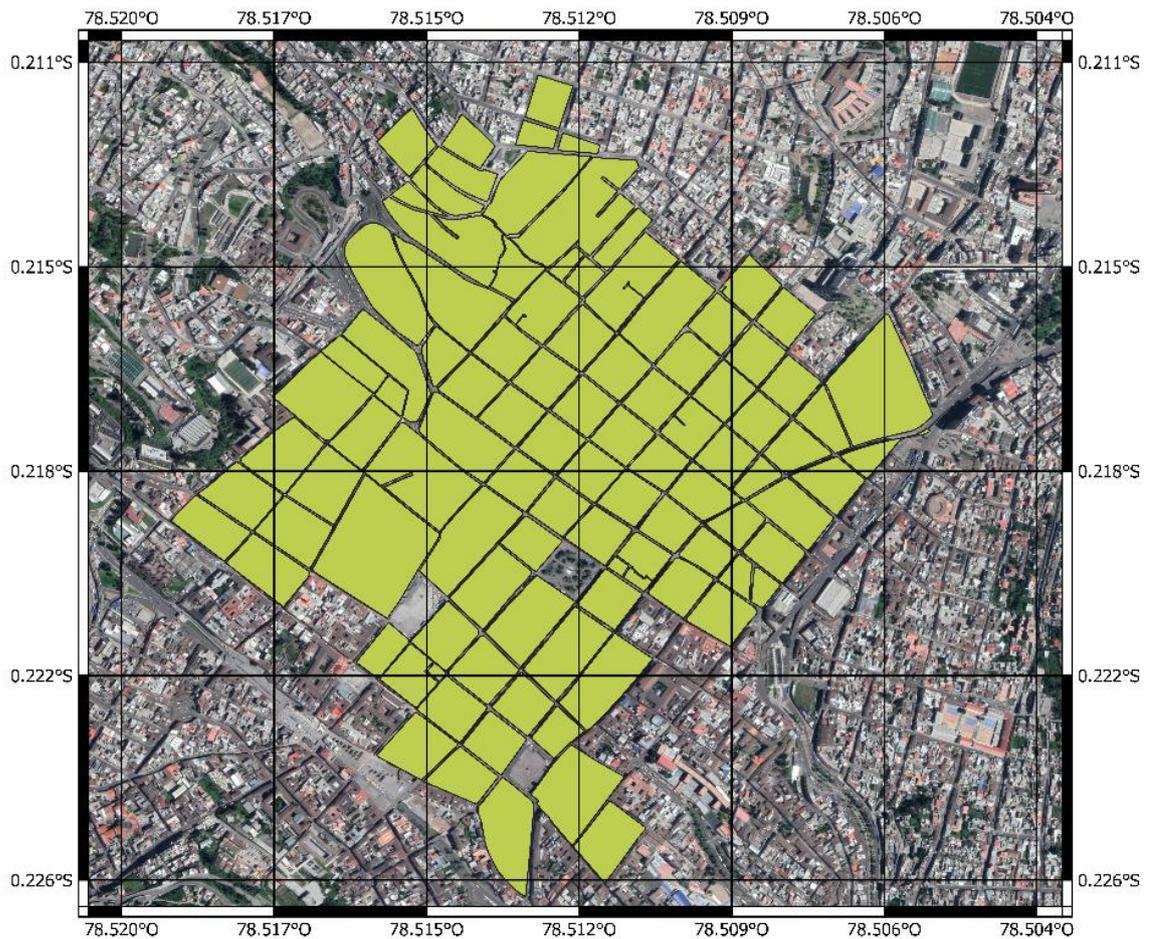


Figura 3. Delimitación por manzanas del Centro Histórico de Quito

El área de estudio se concreta en un total de 101 manzanas y 2126 edificaciones en total siendo 1183 de carácter residencial. Su delimitación geográfica es al Sur-Oeste por la calle Rocafuerte, por el Sur-Este la Av. Pedro Vicente Maldonado, por el Nor-Este la calle Francisco de Caldas y al Nor-Oeste la calle Carchi.

2.3.3. Resultados según su Ocupación

El levantamiento de datos se efectuó con una muestra total de 2126 edificaciones; de las cuales 44.4% que equivalen a 943 edificaciones corresponden a construcciones cuyo uso actual está relacionado a desarrollo cultural, educativo, comercial, religioso o institucional. La población en esta zona se encuentra en decrecimiento y varios de sus habitantes han optado por intercambiar el uso principal de sus viviendas residenciales convirtiéndolas a un uso comercial o cultural o mixto.

La Figura 4 muestra la distribución de las edificaciones en la zona de estudio escogida. Las residencias unifamiliares (RES1) son el tipo de edificaciones más comunes en el Centro Histórico con un porcentaje de 27%. El segundo tipo de residencias que más se manifiesta en la zona de muestra son las viviendas mixtas (MIX) (21%), de las cuales se evidencia que varias de ellas se construyeron como residencias unifamiliares, pero adaptaron el primer piso para obtener un uso comercial, una práctica común en esta zona al ser un sitio turístico. Finalmente, las viviendas multifamiliares (RES2) con un porcentaje de 8% son aquellas residencias de varios departamentos individuales.

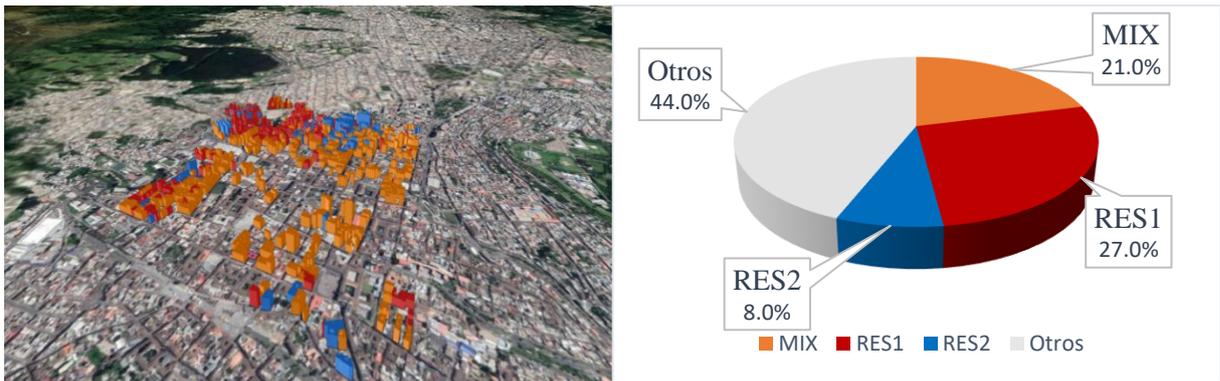


Figura 4. Viviendas Según la Ocupación

2.3.4. Resultados según Material de construcción de la pared

Los tipos del material de construcción determinados en las viviendas del Centro Histórico se dividen en 4 categorías: Adobe, Ladrillo, Mampostería de Bloque y Concreto. Para los materiales se hizo uso de Google Earth para observar de manera más precisa las edificaciones para realizar su clasificación.

El adobe, denominado por GEM como [ADO] es un tipo de material hecho a base de arcilla, arena, agua y materiales orgánicos moldeados en forma de bloque y puede ser usado en mampostería reforzada o no reforzada. Su uso se ha extendido ampliamente debido a su bajo costo y facilidad de construcción, sin embargo, el adobe también es uno de los materiales con la menor resistencia a las fuerzas sísmicas lo puede categorizarlo como un material vulnerable.

El ladrillo, denominado por GEM como [CLBRS] es un tipo de material hecho a base de arcilla y un proceso de cocción; este es uno de los materiales con mayor uso en la construcción. Su rendimiento frente a la actividad sísmica depende en gran parte de la configuración de la construcción, así como el número de pisos y la resistencia propia del bloque (Brzev et al, 2013)

Finalmente, el concreto y el bloque de concreto, denominados por GEM como [CR] y [CB99]. Es uno de los materiales que actualmente brindan alta resistencia a fuerza sísmica,

siempre que se haya seguido las recomendaciones de construcción con Bloque de concreto. Este material puede aumentar su resistencia y rendimiento cuando se utiliza el reforzamiento aumentando la ductilidad de la construcción.

La Figura 5 muestra la distribución del tipo de Material utilizado en las paredes del Centro Histórico. La tipología dominante es el ladrillo con un porcentaje de 41.2%, seguido por el bloque de concreto con 34.4% y el adobe con 24.3%. Las edificaciones de adobe son edificaciones que se encuentran en un grado de vulnerabilidad considerable debido a su baja resistencia frente a las cargas sísmicas.

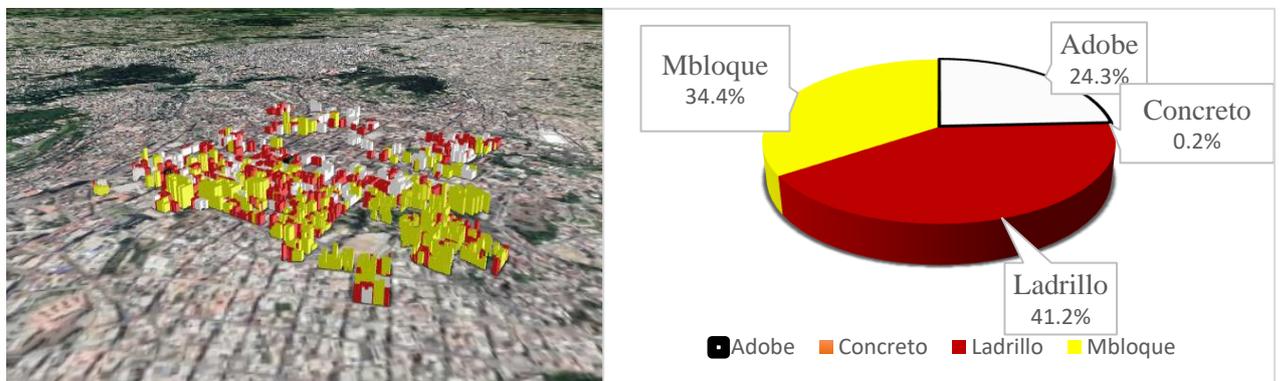


Figura 5. Viviendas Según el Material de Construcción

2.3.5. Resultados según Número de Pisos

El levantamiento de datos demuestra como resultado que el 49.8% de las edificaciones del Centro Histórico corresponden a viviendas de 2 pisos de altura seguidos por un porcentaje de 27.7% de las edificaciones de 3 pisos. Los edificios de poca altura tienden a vibrar con mayor frecuencia cuando se encuentra bajo sismos de periodos cortos (<1 seg) a diferencia de los edificios de mayor altura que son afectados por sismos de periodos largos (>1seg) (IRIS Earthquake Science, 2015).

Debido a que los edificios de menor altura, en especial aquellos entre 1-3 pisos, son el tipo de viviendas con mayor recurrencia en la zona de muestra; se espera que los sismos de menor periodo de vibración sean los que afecten considerablemente en este tipo de residencias.

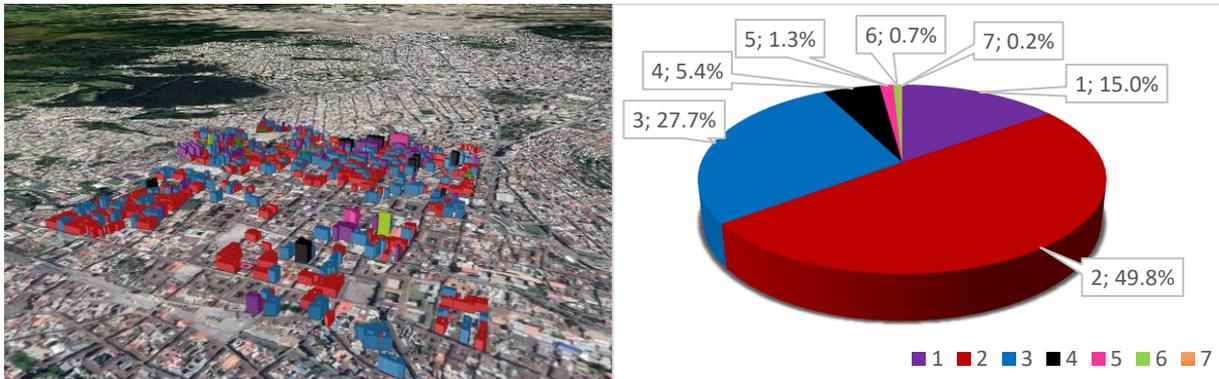


Figura 6. Viviendas Según el Número de Pisos

2.3.6. Resultados según Sistema Estructural de Resistencia Lateral

El muro no reforzado, denominado por GEM como [MUR], es un tipo de mampostería hecho a base de diversas unidades de construcción como el ladrillo, bloques huecos de concreto, piedra o adobe. Este sistema estructural es uno de los más vulnerables debido a su baja ductilidad y tendencia al colapso de forma instantánea (FEMA, 2019).

El pórtico, es uno de los tipos de sistema de resistencia lateral más efectivos a las cargas horizontales ya que se conforma por marcos resistentes a momentos. Este tipo de sistema estructural se complementa por el uso de mampostería tanto estructural como no estructural. El enfoque básico es que exista la cooperación dentro un sistema de vigas y columnas reforzadas que, en conjunto, ofrecen una mayor rigidez (Baikerikar, 2014).

El muro es el sistema de mayor recurrencia en la muestra de residencias del Centro Histórico, con un porcentaje de 68.2%, el muro es uno de los sistemas más utilizados debido a su rapidez de construcción y bajo precio, sin embargo, estas residencias se encuentran en una zona de alto riesgo sísmico, lo que determina que haya un alto nivel de vulnerabilidad antes las cargas laterales de un sismo.

El pórtico es el siguiente sistema dominante y este representa el 30.7% del total de las residencias. Durante el levantamiento de datos se observa que algunas de estas residencias a pesar de utilizar este sistema de resistencia, presentan deficiencias ya que se observa que fueron construidas bajo poca rigurosidad de las normas de construcción o también porque la edificación se encuentra en condiciones estructurales de baja calidad y ductilidad.

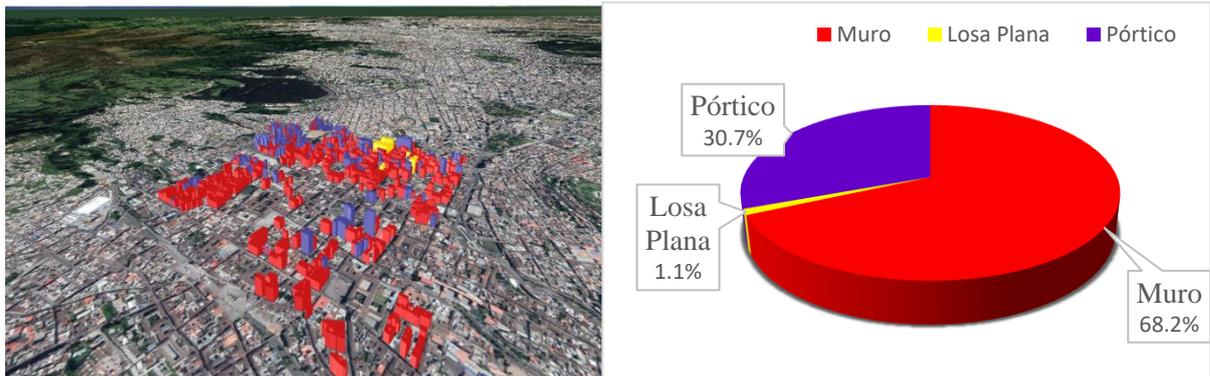


Figura 7. Viviendas Según sistema de resistencia lateral

3. CAPITULO III: ESTUDIO DE AMENAZA SÍSMICA DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO

El estudio de amenaza sísmica conocido también como SHA (Seismic Hazard Analysis) es un método de análisis utilizado en la modelación de movimientos de tierra como consecuencia de un sismo previo. Este sistema de análisis se divide en dos categorías principales: determinístico y probabilístico los que se diferencian por la perspectiva que cada una usa en cuanto a la incertidumbre (Gerstenberger et al, 2020). El método determinístico analiza un solo evento sísmico mientras que el modelo probabilístico es la combinación de varios sismos para sus diferentes variables en magnitud o tiempo de ocurrencia.

3.1.Fuente sismogénica del Ecuador

Ecuador es un país cuya fuente sísmica se encuentra relacionada con su ubicación en el cinturón de fuego del océano Pacífico, específicamente, en la zona noroccidente de Sudamérica. Esta zona se caracteriza por la formación de un sistema de varias fallas de carácter activo que interactúan con la subducción que causa la placa oceánica de Nazca. En Ecuador el principal sistema de fallas activas es el Pallatanga-Chingual cuyo inicio es en Guayaquil y continua hasta Pallatanga.

El sismo más grande registrado en Ecuador corresponde al sismo de 1906 en donde se produjo una zona de ruptura de un tamaño de aproximadamente 400-500 km en la zona de la placa del Pacífico, sitio en el que la subducción se mueve a una velocidad de 61 milímetros en un año (Martínez et al, 2017). La cordillera andina del Ecuador se separa en dos zonas principales: la Cordillera Oriental Metamórfica y la Cordillera volcánica occidental que se separan por la Depresión Interandina. (Alvarado et al, 2014).

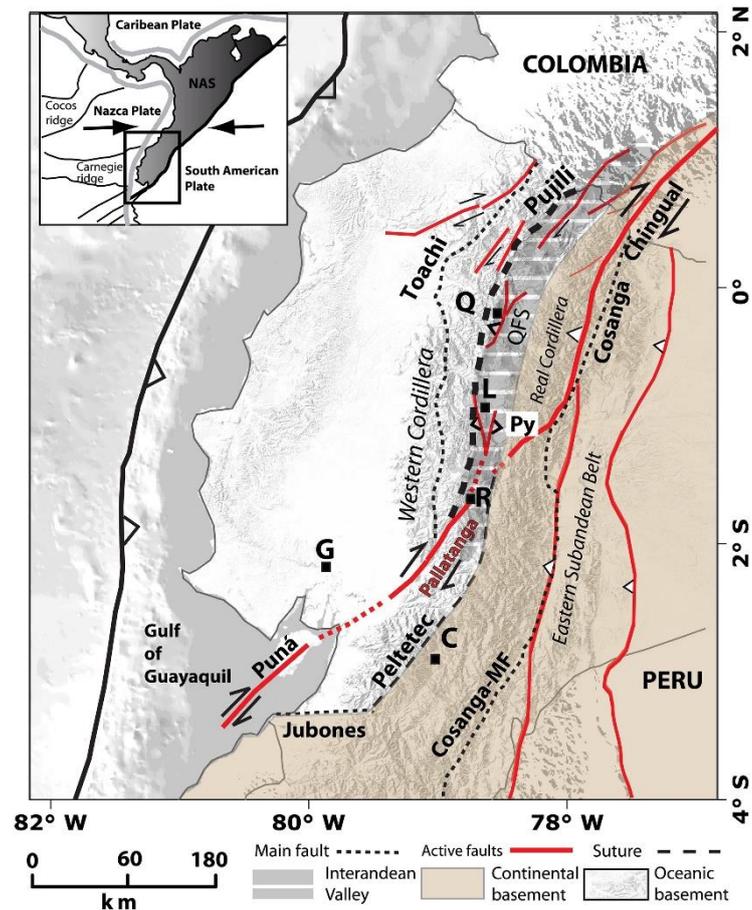


Figura 8. Mapa tectónico de Ecuador. (Alvarado et al, 2016)

3.2. Fuente sismogénica de Quito

El foco de interés para este trabajo es en la ciudad de Quito, específicamente, en el área denominada Centro Histórico. Quito al ser una ciudad ubicada en la zona Norte de la Cordillera de los Andes, se encuentra a una altura de 2800 metros sobre el nivel del mar con una población de aproximadamente 2.600.000 de habitantes siendo la ciudad de mayor densidad poblacional para el año del 2020 (CAMICON, 2020).

La ciudad de Quito se ha desarrollado en el Sistema de Fallas de Quito (QFS), la misma que se extiende a una longitud de 60 km a lo largo de la Depresión Interandina en el norte de Ecuador. Este sistema de fallas se asocia a micro actividades sísmicas de magnitud promedio de 4.0 Mw. Según Alvarado et al (2014), los sismos que se producen en esta zona son principalmente de mecanismos de falla inversa.

En Quito también se encuentra el sistema de fallas de Guayllabamba (GFS) que se ubica al noreste del Sistema de Fallas de Quito creando una transferencia de tensión regional hacia Colombia. Ambos sistemas de fallas GFS y QFS se encuentran activos y son de especial interés al ser las más cercanas a la ciudad de Quito. (Alvarado et al, 2014).

Los eventos que ocurren en estas fallas son de magnitudes menores a 7 Mw, sin embargo, debido a que ocurren a poca proximidad de la superficie del suelo, estos han causado pérdidas humanas y económicas, debido también a que es muy común que su ubicación sea cercana a ciudades de alta densidad poblacional.

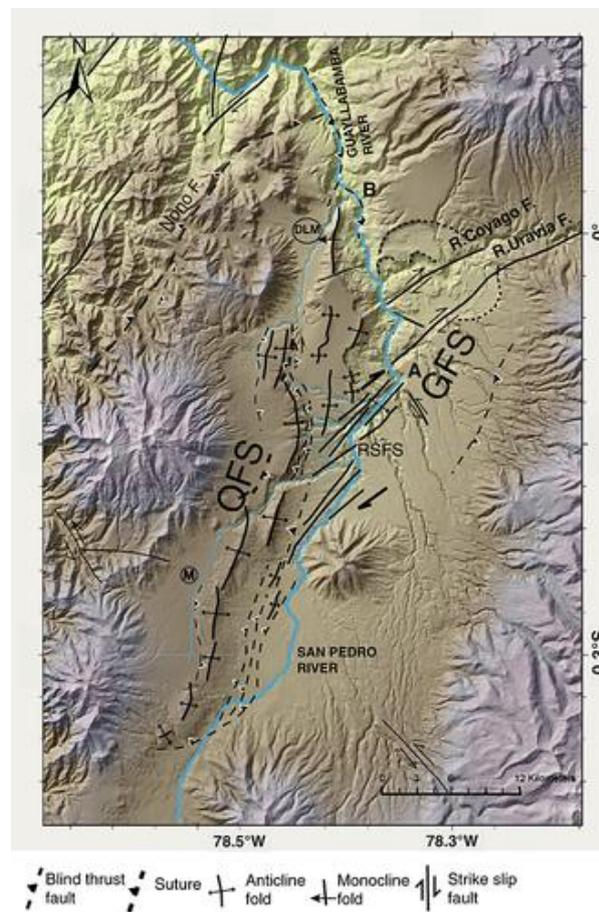


Figura 9. Mapa tectónico de la región de Quito y sus fallas. (Alvarado et al, 2014)

3.3.Evento puntual: Sismo de 11 agosto 1990 de Pomasqui

El sismo de Pomasqui del 11 de agosto de 1990 es un sismo que tuvo afectación en la zona norte de la Ciudad de Quito que causó varios daños estructurales. La zona del epicentro de este sismo se determinó entre dos segmentos importantes del sistema de falla de Quito en la zona norte de esta misma. Estos fueron los segmentos de San Juan de Calderón y los segmentos de Catequilla (Beauval et al, 2010).

Este sismo de tipo de falla inversa ocurrió en tiempo local a las 22h00 y su magnitud fue de 5 Mw. A pesar de que no tuvo una magnitud extrema, sus efectos fueron notorios debido a su carácter cortical superficial, causando la muerte de 3 personas, 900 viviendas afectadas y 417 familias damnificadas, así como de varios deslizamientos en la zona (IGEPN, 2011).

3.3.1. Descripción de las edificaciones afectadas en el sismo de 11 de agosto de 1990

La intensidad del sismo del 11 de agosto de 1990 no fue de gran magnitud, sin embargo, las afectaciones en las viviendas de Pomasqui fueron significativas tanto para el evento sísmico principal, así como de sus réplicas. La caracterización de las viviendas de la zona toma un papel importante en las razones de estas afectaciones porque la mayoría de estas no fueron construidas bajo códigos de resistencia sísmica.

Las construcciones de la zona afectada se caracterizan por utilizar más material de adobe o tapial como base de construcción. Los sistemas estructurales se conforman de mampostería confinada y pared portante en las cuales, sus defectos se relacionan con el uso de materiales de baja resistencia para una zona sísmica. (Singaucho, 2009).

3.3.2. Modelación del movimiento del terreno para evento sísmico puntual

La ruptura se define por medio de los ángulos de ruptura: rumbo (strike) ángulo del plano con el norte de la tierra, buzamiento (dip) ángulo entre el plano de discontinuidad y la superficie de la tierra, ángulo de movimiento (rake) o ángulo rotacional y dirección del movimiento (slip). A partir de este modelo se puede obtener los valores de PGA definidos por una latitud y longitud que se presentan en la zona de estudio, este modelo demuestra que mientras más alejado se encuentre uno del punto del hipocentro, esta intensidad PGA se atenúa con la distancia.

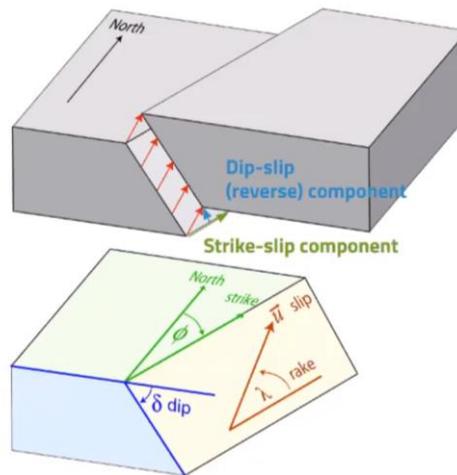


Figura 10. Ángulos de ruptura (GEM, 2020)

3.3.2.1. Parámetros de ruptura Del sismo de 11 de agosto de 1990

Para la definición de la ruptura se utilizan 3 parámetros que caracterizan la falla: tipo, magnitud y la geometría. Para el evento sísmico se utilizará los datos proveídos por el Global Centroid Moment Tensor Project (GCMT), para el sismo medido el 11 de agosto de 1990 en donde la magnitud del sismo fue de 5.0Mw junto con los siguientes parámetros característicos del sismo:

Tabla 1. Parámetros para definir la ruptura del sismo del 11 de agosto de 1990 (Alvarado et al, 2014)

Parámetros del sismo de 11 de agosto de 1990 en Pomasqui	
Strike (grados)	323
Dip (grados)	45
Rake (grados)	52
Magnitud (Mw)	5.0
Longitud de hipocentro (grados)	-78.43
Latitud de hipocentro (grados)	-0.039
Profundidad (Km)	15

A partir de estos datos el programa OpenQuake calcula la geometría de la superficie de ruptura que se utiliza para la generación de los modelos de movimiento de terreno.

3.3.2.2. Archivo de configuración

El escenario modelado es de tipo determinístico por lo tanto se utiliza la opción de “Earthquake Scenarios” de OpenQuake para el cual se utilizaron los siguientes datos de entrada:

- Archivo de ruptura del sismo que se determina a partir de los parámetros de definición de la ruptura.
- Espaciamiento de grilla para el modelo de la ruptura (km) el cual se determina correspondientemente con el tamaño de la zona analizada, este se definió un espaciamiento de 1 km para obtener valores más discretizados.
- La región en grilla para el cual se utiliza una discretización de grilla de 0.5 km para la región de la zona del evento hipotético definido por las siguientes coordenadas:

Tabla 2. Coordenadas de zona de Estudio del CHQ para modelo de movimiento de suelo

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

- Condiciones de sitio: parámetros que dependen de las condiciones de suelo. Para la zona de estudio existen 3 tipos de suelos predominantes denominados según NEC como: B, C y D.

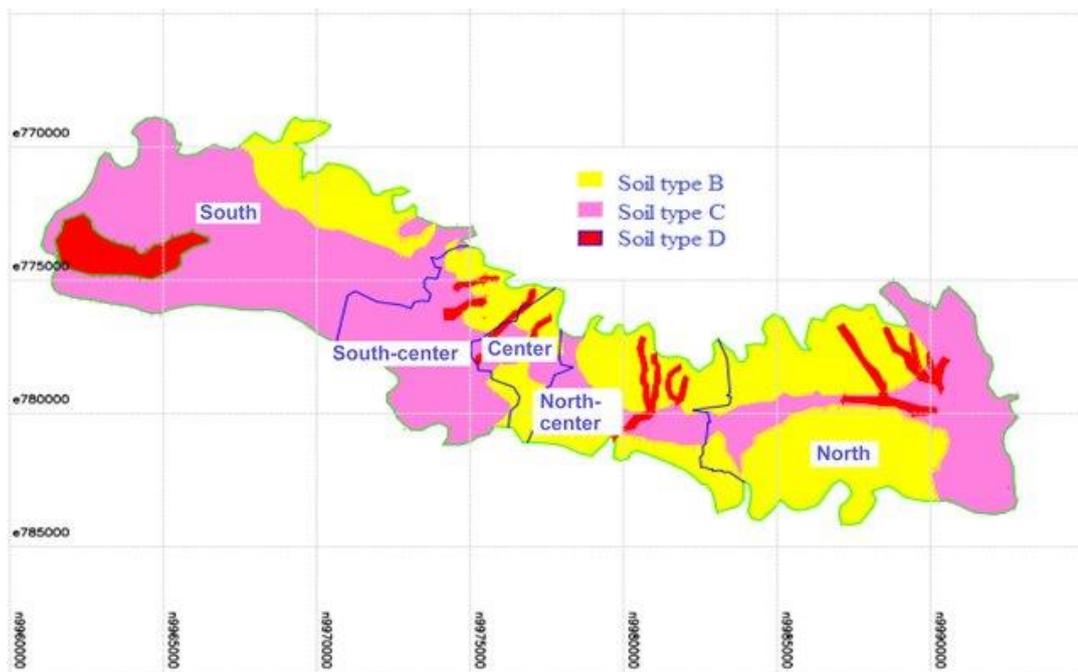


Figura 11. Clasificación del tipo de suelo en Quito (Aguiar, Rivas-Medina, Caiza, & Quizanga, 2017)

El tipo de suelo D tiene una velocidad de cortante entre 360 y 180 m/s, pero este es solo una pequeña porción de suelo de la zona. El suelo de tipo C es el que conforma en mayor parte la zona de estudio y sus velocidades se encuentran entre 760 m/s y 360 m/s y finalmente el tipo B con velocidades de 1500 m/s a 760 m/s (NEC-SE-DS, 2015). Al ser el tipo de suelo C el predominante, se aplicaron sus propiedades correspondientes a este tipo de suelo:

Tabla 3. Condiciones de sitio

Condiciones	Valores
Velocidad promedio vs30 (m/s)	760
Velocidad promedio vs30	Inferida
Profundidad mínima (m) en donde vs30 \geq 1.0 km/s (z1.0)	100.0
Profundidad mínima (m) en donde vs30 \geq 2.5 km/s (z2.5)	2.0

3.3.2.3. Parámetros de cálculo para el modelo de movimiento de terreno.

- Ground Motion Prediction Equation (Por sus siglas en inglés GMPE) se refiere a las ecuaciones desarrolladas para la zona de análisis que permiten obtener una predicción de la aceleración en la superficie del terreno. Para el análisis del CHQ se utiliza las ecuaciones de: **AkkarBommer2010**, **BooreAtkinson2008** y **ZhaoEtAl2006Asc** al ser modelos que se han aplicado previamente en estudios de amenaza sísmica Quito realizados por Beauval et al, cuyos resultados acertados (2010).

El modelo de AkkarBommer2010, BooreAtkinson2008 son ecuaciones de atenuación cuyo uso se relaciona con fallas corticales. El primer modelo es basado en datos de Italia y Europa del Este y se utiliza en sísmico de magnitud Mw: 4-7.6 grados para fallas normales e inversas, el modelo de BooreAtkinson2008 es un modelo de predicción de sismo para un rango de Mw 5-8 utilizado en fallas normales, inversas o de falla desconocida. Por otro lado,

el modelo ZhaoEtAl2006Asc es utilizado en sismos causados por subducción ya sea de interplaca o interfaz y ocasionalmente sismos corticales (Cañizares, 2017).

- IMT son los tipos de medidas de Intensidades de interés siendo el PGA (Peak Ground Acceleration) el valor de interés para la zona de estudio.
- Modelo de correlación JB2009: utilizado en los modelos de variabilidad.
- Distancia máxima a la fuente de falla: distancia en km a la cual se extiende el estudio de la zona afectada por el punto de la ruptura de falla, la distancia para este estudio fue de 300 km.

3.3.2.4. Modelo de la mediana del movimiento del terreno.

La mediana es el tipo de análisis estadístico que utiliza un truncamiento de 0, es decir no considera una desviación estándar de los todos los datos de intensidad medidas al tomar el promedio de todos los eventos de la predicción.

Tabla 4. Parámetros para modelar la mediana de aceleraciones del terreno

Nivel de truncamiento	0
Número de campos de movimiento de terrenos a ser generados	1

3.3.2.5. Resultados de modelos de movimiento de terreno por cálculo de mediana

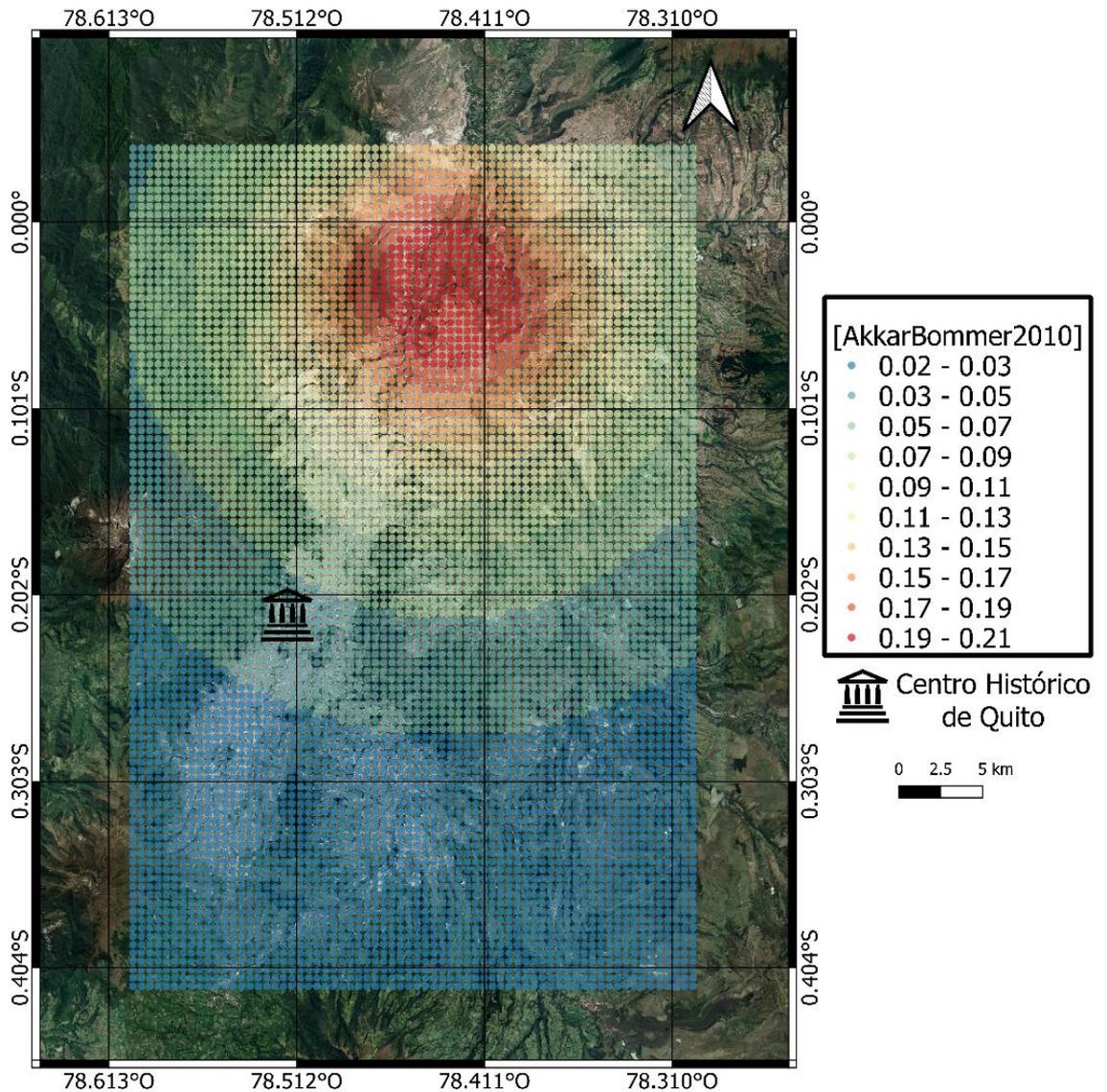


Figura 12. Mediana de aceleración de terreno en la falla de ruptura, unidades en $[g]$.

La Figura 12 es una representación de las intensidades predichas sobre el punto de ruptura utilizando un cálculo de mediana y las ecuaciones de predicción de aceleración de AkkarBommer2010. Las gráficas de mediana de movimiento de terreno por medio de los otros GMPEs se encuentran adjuntos en los anexos B y C. Los tres modelos al ser calculados con la mediana presentan un comportamiento de atenuación continua conforme se aleja del epicentro de la falla.

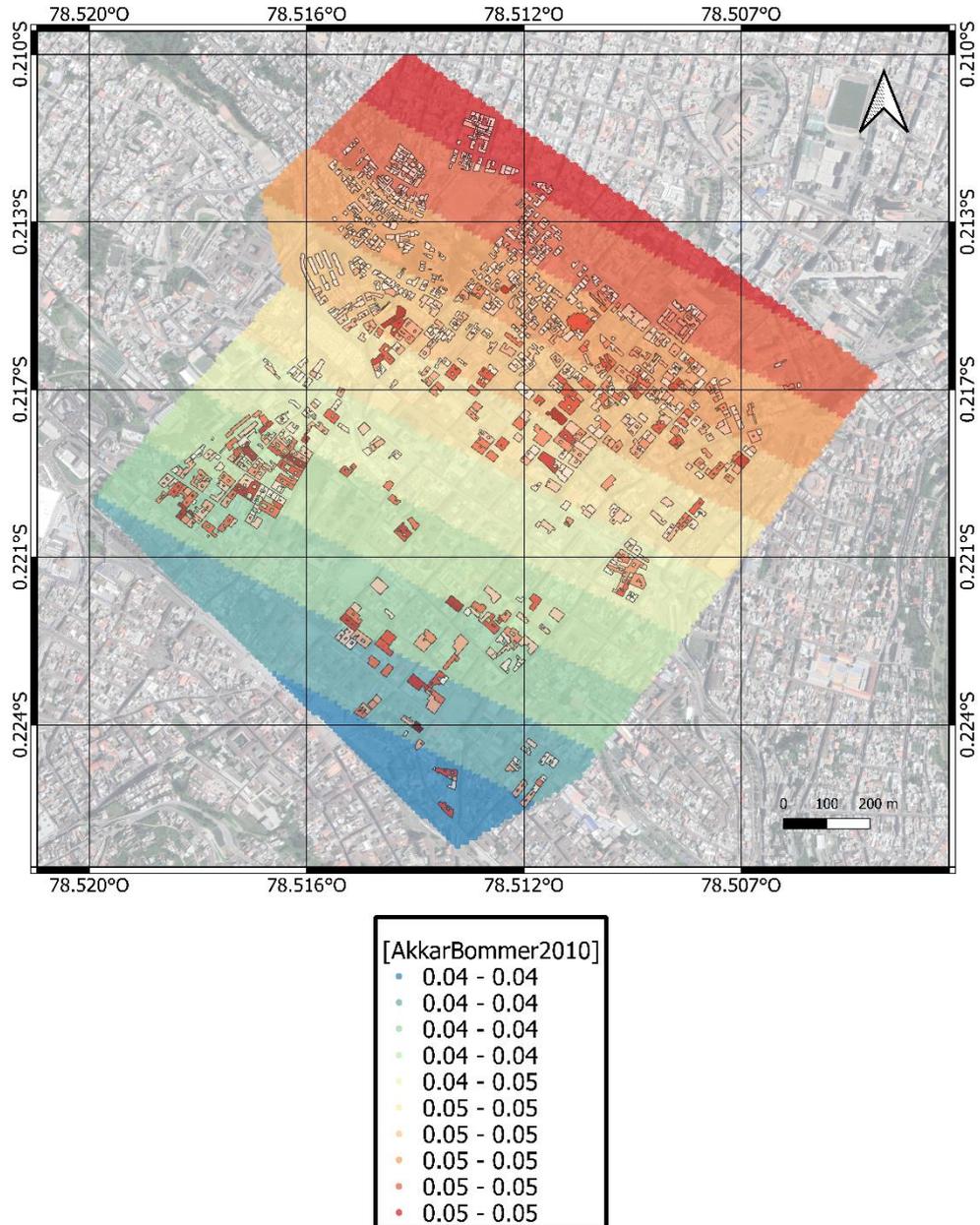


Figura 13. Mediana de aceleración de terreno sobre área de estudio del CHQ, unidades en [g].

Los modelos de mediana de movimiento para los tres GMPE (Anexos G, H e I) demuestran estar bajo valores cercanos de intensidades máximas (rango de 0.03g a 0.05g) y todos tienen la tendencia de ubicar esta aceleración máxima zona norte del área de estudio en dirección del epicentro de la falla del sismo.

3.3.2.6. Modelo de variabilidad del movimiento del terreno.

El modelo de cálculo por mediana no es suficiente para definir el movimiento de terreno debido a la existencia de variabilidad en el comportamiento de los sismos. Este concepto nace del hecho de que los movimientos de terreno, por su naturaleza, no son isotrópicos en la superficie de la corteza; esto quiere decir que el suelo no se mueve de la misma manera en todos los puntos de una zona de estudio.

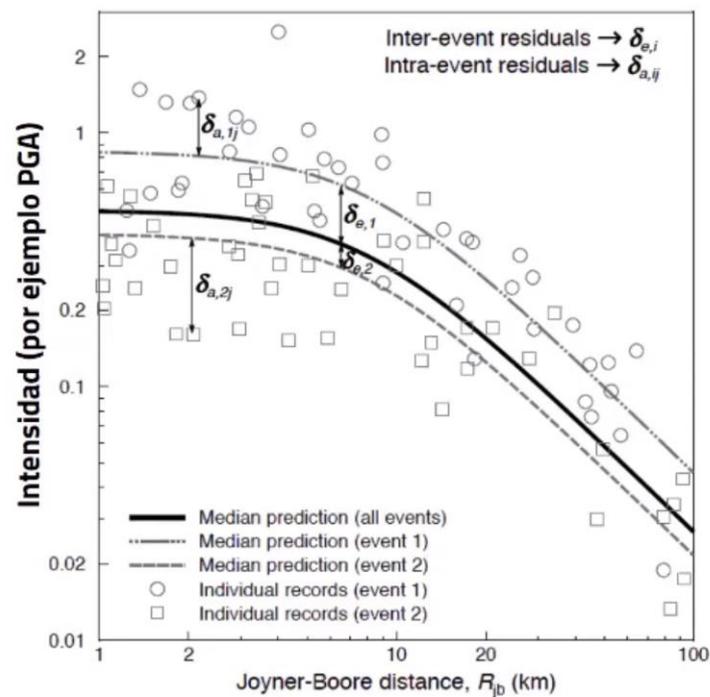


Figura 14. Predicción por mediana y por variabilidad (GEM, 2020)

Por lo tanto, tomar en cuenta la variabilidad es necesario debido a que en un evento sísmico va a existir una incertidumbre incluso si se está analizando un mismo sismo con sus mismos tipos de distancia, magnitud y ruptura. Para incluir la variabilidad, el modelo de movimiento de terreno se calcula utilizando un nivel de truncamiento 3 para un cálculo de 200 campos de movimientos generados:

Tabla 5. Parámetros para modelar la variabilidad de aceleraciones del terreno

Nivel de truncamiento	3
Número de campos de movimiento de terrenos a ser generados	200

3.3.2.7. Resultados de modelos de movimiento de terreno por cálculo de variabilidad

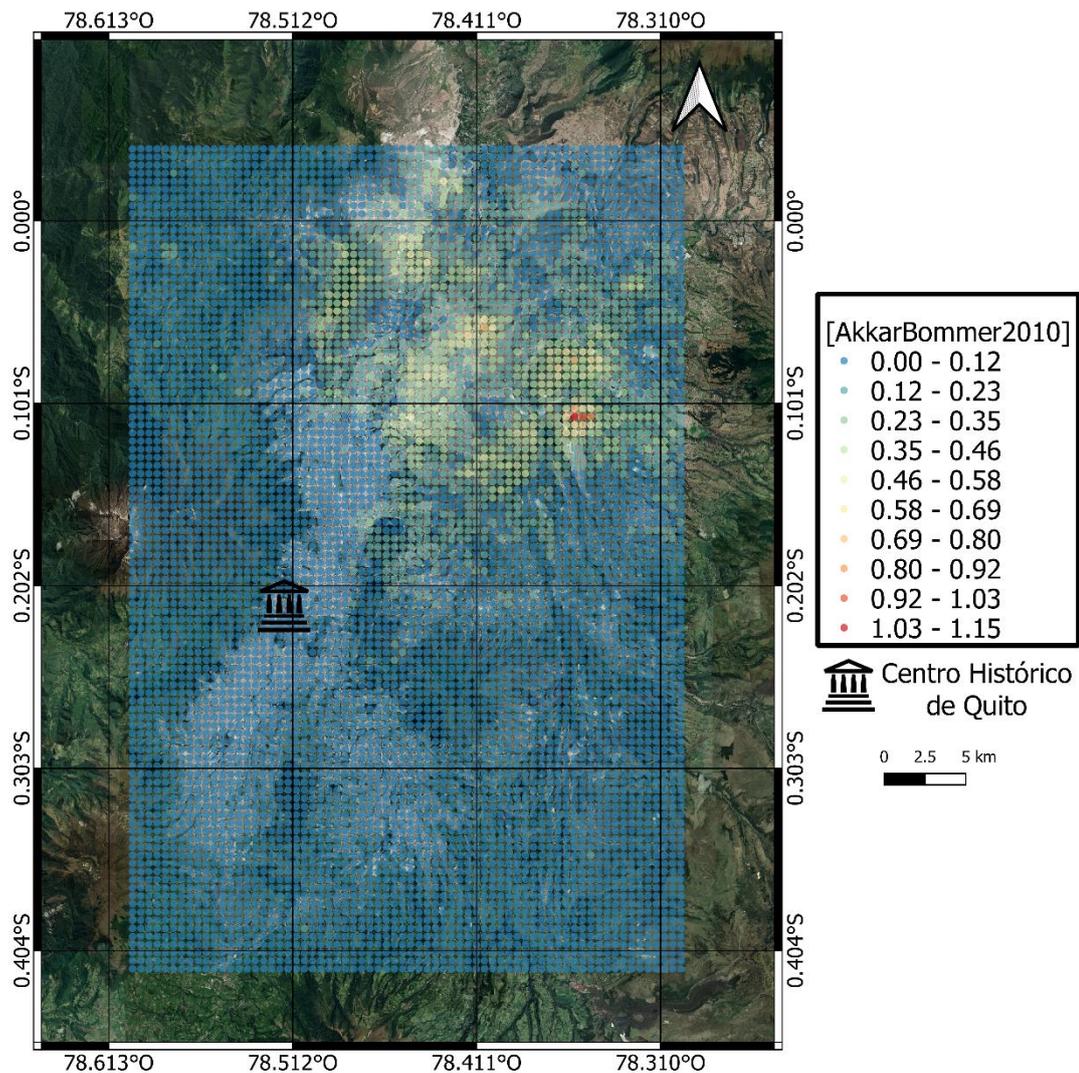


Figura 15. Variabilidad de aceleración de terreno en la falla de ruptura, unidades en $[g]$.

Los modelos de movimiento de terreno aplicados en la falla de ruptura utilizando un nivel de truncamiento de 3 se muestran en los anexos D, E y F. Para los tres GMPEs es evidente que la atenuación ya no es suave ni continua, más bien es aleatoria.

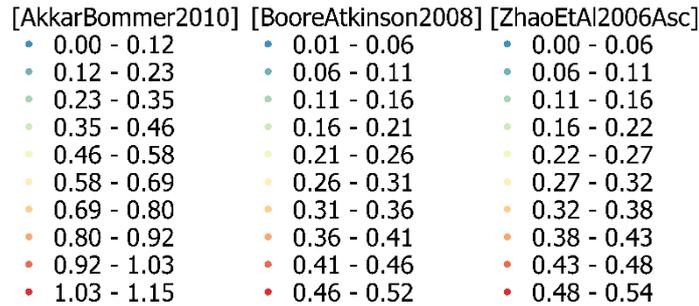


Figura 16. Rangos de aceleración de terreno [g] por variabilidad para el modelo en la falla de ruptura

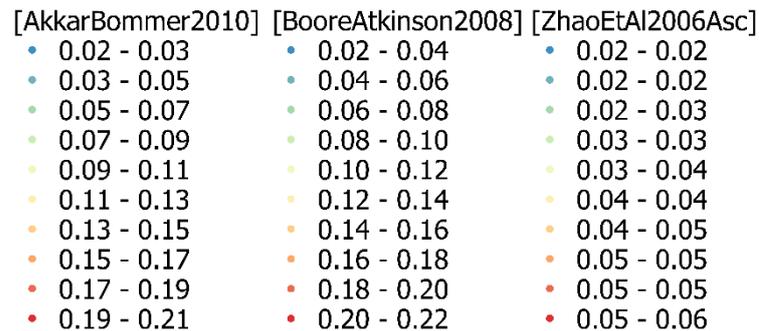


Figura 17. Rangos de aceleración de terreno [g] por mediana para modelo en la falla de ruptura

Para los modelos sin variabilidad, los modelos de movimiento de intensidad con valores más parecidos entre sí son para AkkarBommer2010 y BooreAtkinson2008 con valores entre 0.19 g a 0.22 g. En un estudio realizado por Egred se determinó una intensidad máxima de 0.18 g para el sismo de agosto de 1990 en la zona del epicentro en Pomasqui (Singaicho, 2009).

Tabla 6. Errores porcentuales de intensidades para los GMPE

	AkkarBommer2010	BooreAtkinson2008	ZhaoEtAl2006Asc
Intensidades [g]	0.2	0.21	0.055
Error Porcentual	11.1%	16.7%	69.4%

Por lo tanto, se decide que el modelo de AkkarBommer2010 es el que representan de mejor manera la simulación del sismo de 1990 al presentar el menor error porcentual entre los tres modelos con 11.1%, a diferencia de ZhaoEtAl2006Asc que por su parte presenta aceleraciones de rangos más bajos a comparación de 0.02 a 0.05 g y un error de 69.4%.

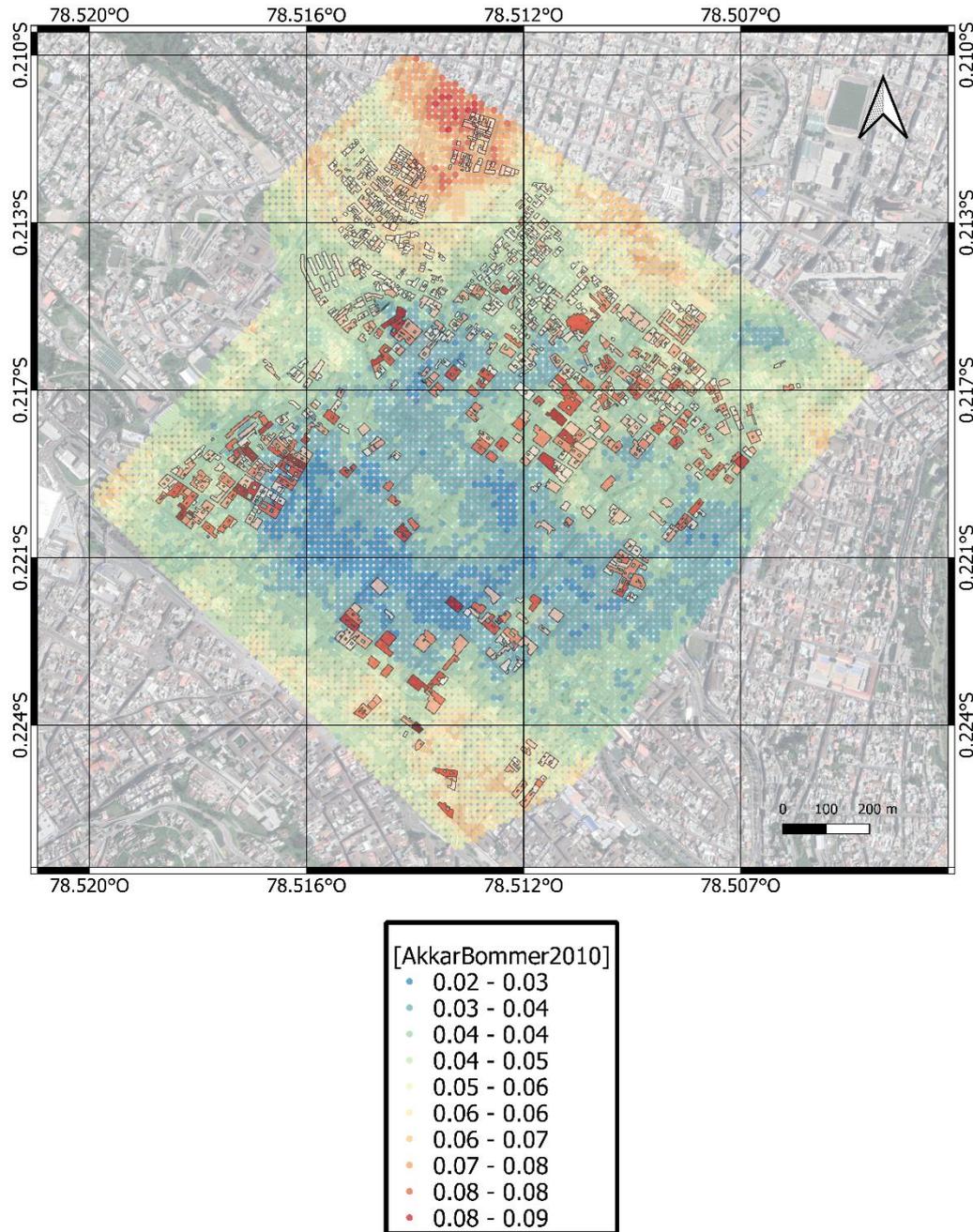


Figura 18. Variabilidad de aceleraciones sobre área de estudio del CHQ, unidades en [g]

[AkkarBommer2010]	[BooreAtkinson2008]	[ZhaoEtAl2006Asc]
• 0.02 - 0.03	• 0.02 - 0.02	• 0.02 - 0.02
• 0.03 - 0.04	• 0.02 - 0.03	• 0.02 - 0.02
• 0.04 - 0.04	• 0.03 - 0.03	• 0.02 - 0.03
• 0.04 - 0.05	• 0.03 - 0.03	• 0.03 - 0.03
• 0.05 - 0.06	• 0.03 - 0.04	• 0.03 - 0.04
• 0.06 - 0.06	• 0.04 - 0.04	• 0.04 - 0.04
• 0.06 - 0.07	• 0.04 - 0.04	• 0.04 - 0.05
• 0.07 - 0.08	• 0.04 - 0.05	• 0.05 - 0.05
• 0.08 - 0.08	• 0.05 - 0.05	• 0.05 - 0.05
• 0.08 - 0.09	• 0.05 - 0.06	• 0.05 - 0.06

Figura 19. Rangos de aceleración de terreno [g] por variabilidad para el CHQ

Finalmente, los modelos de movimiento de terreno en el CHQ, aplicando un nivel de truncamiento de 3 para considerar la variabilidad se encuentran en los anexos J, K y L. Al comparar los tres modelos se puede notar que bajo el efecto de un sismo parecido al del 11 de agosto de 1990; los valores de aceleraciones máximas que se predicen en la zona del CHQ no superan los 0.09g.

En los tres modelos se observa que este valor máximo de aceleración se ubica de manera predominante en la zona norte del área analizada; más específicamente en las calles Concorcunga, Carchi y Tapi, calles cercanas a los barrios San Juan y El Tejar. Por otro lado, la zona central del CHQ presenta predicciones de aceleraciones más reducidas de magnitudes de 0.02g.

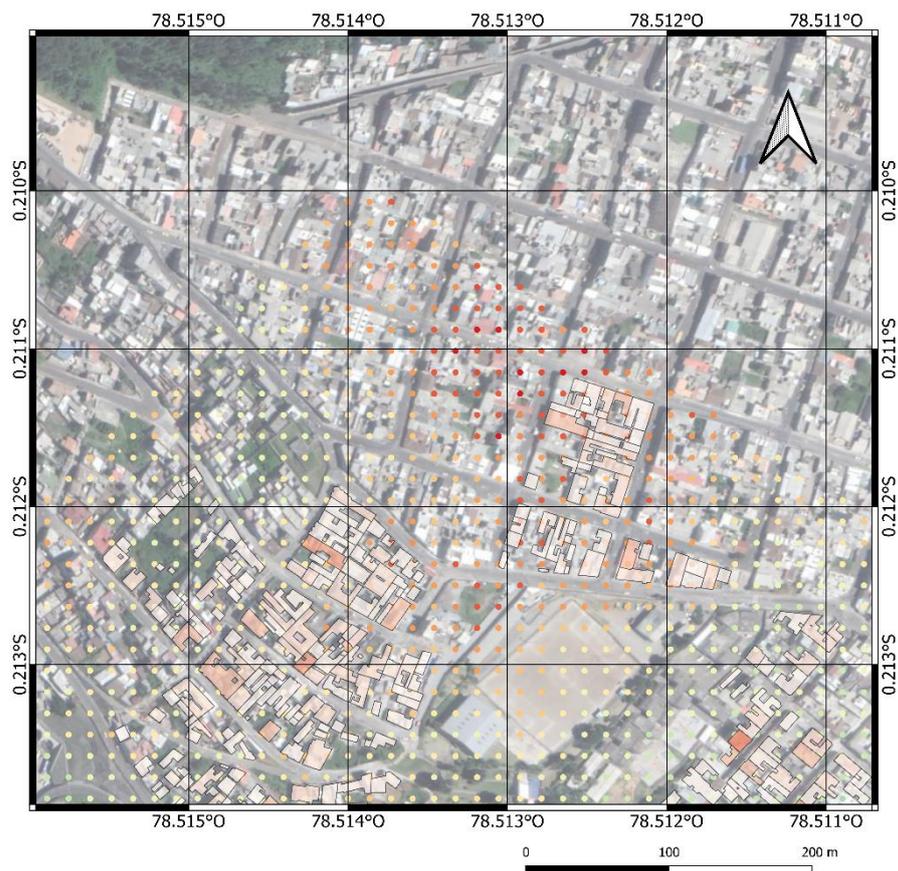


Figura 20. Calles de la zona con predicciones de intensidades entre 0.08-0.09 [g]

Como se puede observar, las intensidades más altas que se pueden esperar en el Centro Histórico como simulación del sismo de agosto de 1990 son de baja magnitud. Sin embargo, su efecto sobre las edificaciones también depende de las tipologías de las edificaciones que se encuentran en el Centro Histórico de modo que, aun si las intensidades en el terreno son bajas, si la edificación no fue construida bajo una norma de construcción o debido al uso de material frágil este podría presentar afectaciones en pérdidas estructurales.

3.4.PSHA (Probabilistic seismic hazard assessment) en CHQ

3.4.1. PSHA (Probabilistic seismic hazard assessment)

El estudio Probabilístico de amenaza sísmica tiene como objetivo principal la cuantificación de las incertidumbres que existen en un evento sísmico para todos sus parámetros como su ubicación, su magnitud y las intensidades que pueden provocar para sismos que se predicen en una zona particular. Uno de los parámetros que determina este estudio es la definición de la probabilidad de retorno para la excedencia de algún tipo de movimiento de terreno debido a un sismo (Baker, 2008).

3.4.2. Datos de configuración para PSHA del CHQ

- Ground Logic Tree

Este archivo contiene una lista completa de modelos de ecuaciones de predicción de movimiento de terreno para las regiones tectónicas que caracterizaran el modelo de PSHA.

- SARA Source Model

El South America Risk Assessment (SARA) project es el modelo de amenaza para los territorios que corresponden al continente Sudamericano. Este proyecto es una compilación de las diferentes bases de datos necesarias para el PSHA. Su uso permite la realización de estudios de riesgo sísmico nacionales, regionales, locales o urbanos; utilizando regulaciones internacionales (Garcia, Weatherhill, Pagani, Rodriguez, & Poggi, 2017).

- PSHA clásico

El archivo de configuración para el PSHA clásico contiene la información de geometría de la región de análisis para el CHQ para la cual se utiliza una grilla de espaciamiento de 0.05 Km, una discretización del área de ruptura con espaciamiento de 3 Km y una velocidad de cortante vs30 de tipo inferida de 760 m/s. Su cálculo se estableció para una probabilidad de excedencia del 0.21% y un periodo de retorno de 475 años. Para su cálculo también se hizo uso de modelo de fuente SARA y se estableció un nivel de truncamiento de 3 para tomar en cuenta la variabilidad.

3.4.3. Mapa de amenaza sísmica en CHQ

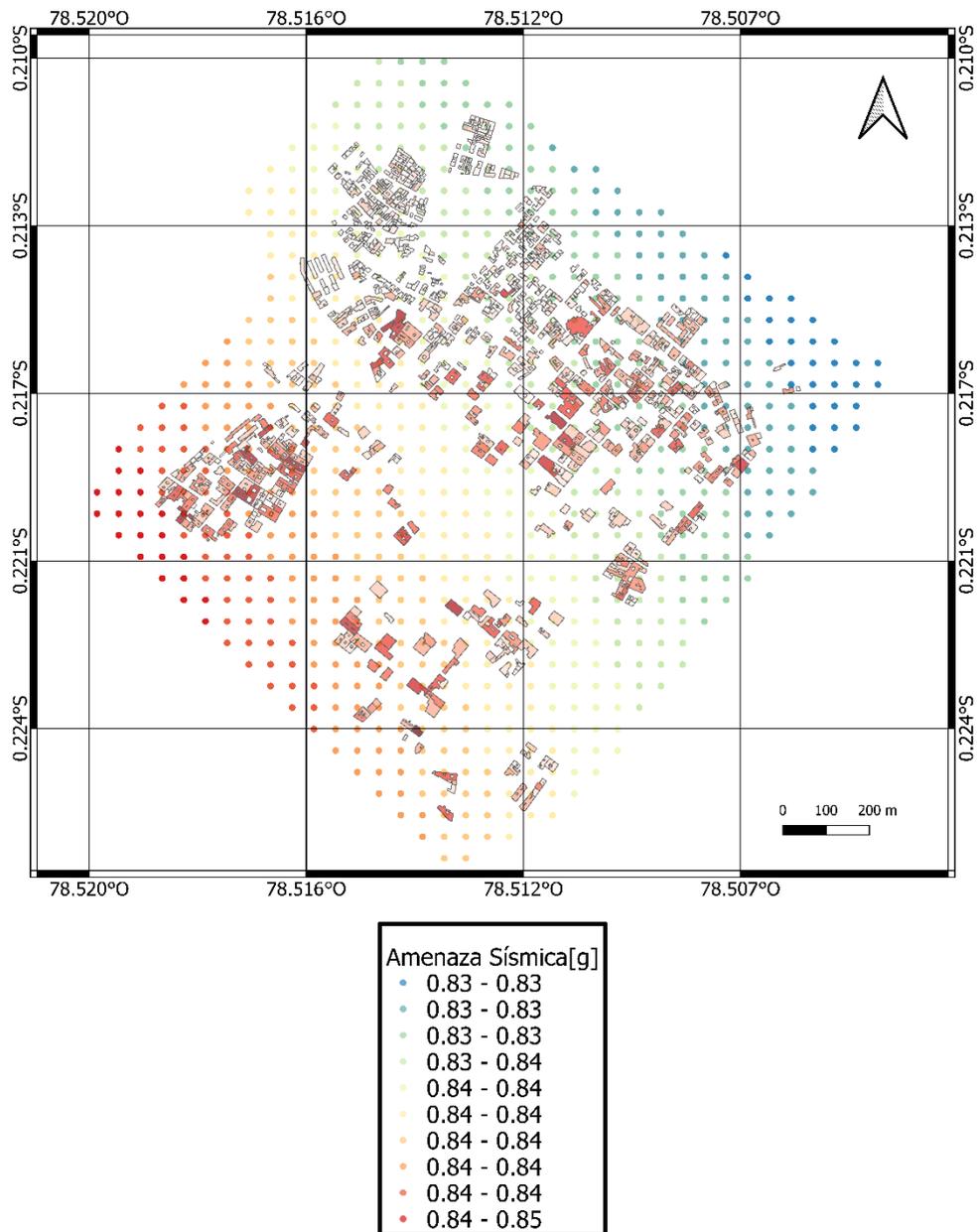


Figura 21. Mapa de amenaza sísmica en el CHQ (PSHA), unidades en [g]

El mapa de amenaza sísmica se compone de los valores de intensidad medidos en una zona en específico extraídos de las funciones de curvas de amenaza e interpolándolos a partir de una probabilidad de excedencia. En este análisis se utilizó un periodo de retorno de 475 años, es decir, una tasa anual de retorno de 0.002105. Como resultados se obtiene una intensidad promedio de 0.84 g, como intensidad máxima 0.85 g y como intensidad mínima 0.83 g.

Un estudio previo de PSHA en la ciudad de Quito había estimado para un periodo de retorno de 475 años un rango de 0.28g a 0.55g de intensidades con un promedio de 0.4g en donde esta variabilidad se relaciona con los GMPE escogidos para el estudio (Beauval et al, 2014). Por otro lado, para la Norma Ecuatoriana de la Construcción, en la sección de zonificación sísmica se define un valor de 0.40 g para la zona de Quito.

Desde una primera comparación se puede observar que los valores obtenidos por OpenQuake son 2 veces mayores que los de la zonificación sísmica de la norma de construcción. Sin embargo, se debe resaltar que las intensidades de la norma son valores que han pasado por varias discusiones y seminarios por parte de expertos a partir de los cuales se definieron las intensidades más adecuadas para las normas de construcción.

4. CAPITULO IV: VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad y la fragilidad sísmica son dos términos de los cuales es necesario definir correctamente sus diferencias. La fragilidad se refiere a la predisposición de las edificaciones a sufrir daños estructurales y vulnerabilidad, por otro lado, se refiere a las pérdidas económicas o humanas causadas por los efectos del sismo.

4.1. Curvas de Fragilidad

Los modelos de fragilidad utilizados en este análisis corresponden al estudio realizado por Martins y Silva cuyos modelos se realizaron por medio de un método analítico para las clases de construcciones de edificios más comunes a nivel mundial (2020). Las curvas de fragilidad se obtuvieron por medio de análisis no lineales basados en sistemas equivalentes de 1 grado de libertad y una gran variedad de registros de movimientos de terreno (Martins & Silva, 2020).

Las curvas de fragilidad se conforman por un eje horizontal utilizando el PGA para estructuras rígidas de baja altura, aceleración espectral (S_a 0.3 s) para algunas estructuras de baja altura y altura mediana, S_a (0.6 s) para estructuras de altura media y (S_a 1.0 s) para estructuras de alta altura. En el eje vertical se presentan las probabilidades de excedencia para daños leves, moderados, severos y completos.

4.2. Curvas de Vulnerabilidad

Las curvas de vulnerabilidad utilizan el modelo de fragilidad y el modelo de consecuencia que establece una relación entre los diferentes estados de daño y el porcentaje de pérdidas que sufre cada uno de esos estados. La curva de vulnerabilidad presenta una línea singular en donde en el vertical se describe el porcentaje de pérdidas económicas y en el horizontal se describe la intensidad de la agitación del terreno.

4.3. Metodología Push Over

La metodología Pushover es un análisis de procedimiento estático no lineal simulando como las fuerzas dinámicas se desplazan hacia los componentes de la estructura. El procedimiento consiste en aplicar cargas hasta llegar límite de debilidad para luego proceder a realizar cambios en la estructura y aplicar de nuevo las cargas. Se continua con la iteración de este proceso y rediseño hasta definir un patrón de fluencia bajo cargas sísmicas (Mohiuddin, 2013).

4.4. Metodología del desarrollo de curvas de vulnerabilidad por Martins y Silva

La metodología utilizada por Martin y Silva para el desarrollo de curvas de fragilidad y vulnerabilidad nació de la necesidad del uso de estas mismas en la evaluación de riesgo sísmico. Para su creación se realizó una recopilación de las clases de edificaciones de interés para un total de 500 clases de edificios cuyos resultados son de libre acceso en la plataforma de OpenQuake.

Los modelos para las curvas de fragilidad consideran ecuaciones de movimiento de terreno para ambientes de tipo de subducción como superficiales ya que estas intensidades pueden influir en los resultados finales de los modelos de fragilidad. Los modelos de las curvas de vulnerabilidad fueron calibrados utilizando estudios de riesgo sísmico a nivel regional y nacional. Su verificación se realiza por medio de un análisis de un Porcentaje de perdida promedio anual (AALR) realizado en 13 diferentes locaciones, estudios en los que se determina que, para edificios de misma altura, la vulnerabilidad de los edificios de mampostería no reforzada es mayor que la de mampostería reforzada (Martins & Silva, 2020).

5. CAPITULO V: ESTUDIO DE RIESGO SISMICO DEL CENTRO HISTORICO DE QUITO

5.1.Riesgo sísmico

El riesgo sísmico se define como la superposición de los estudios de amenaza, exposición y vulnerabilidad. Este tipo de estudio permite obtener una probabilidad de pérdidas o daños que pueden ocurrir a partir de un movimiento telúrico además de poder evaluar las consecuencias económicas y estructurales que pueden derivarse de este evento.

Un análisis de riesgo sísmico se caracteriza por examinar el impacto que puede tener un evento por medio de tres contextos principales: la infraestructura, efectos en las personas y las actividades sociales y ambientales. Una amenaza sísmica puede causar acciones directas o indirectas a cortos y a largos plazos (Yamin, Ghesquiere, Cardona, Ordaz, & Ordaz, 2013)

En el estudio de riesgo sísmico para el Centro Histórico de Quito se realizará un análisis de las pérdidas directas esperadas a partir de los daños que se generan en la infraestructura, tomando en cuenta su tipología constructiva y su vulnerabilidad sísmica.

5.2.Riesgo sísmico en Quito

Un estudio de riesgo sísmico de Quito determinado el sismo de agosto de 1987 obtuvo un resultado de probabilidad de daños de aproximadamente 10 a 20% en la zona del centro histórico de Quito. En este estudio se determina que las zonas de Quito con mayores afectaciones bajo este sismo son en la zona norte de la ciudad y en la zona del Centro Histórico; el último debido a los materiales de construcción de uso en las edificaciones como son el adobe y ladrillo de sistemas de muros no confinados (Chatelain et al, 1999).

5.3. Configuración de riesgo sísmico del CHQ en OpenQuake

- **Exposición:** archivo con todas las propiedades específicas para cada predio definidas en el capítulo de exposición. Los parámetros utilizados principalmente en el cálculo son el del avalúo de cada predio y el de su tipología.
- **Ruptura:** archivo de la definición de la ruptura causada por el sismo de estudio con una grilla de discretización de 3 Km.
- **Condiciones de sitio:** archivo “Quito_CH_site_conditions” que contiene diferentes velocidades vs30 de la zona del distrito metropolitano de Quito, este documento fue facilitado por el Global Earthquake Model.
- **Curvas de vulnerabilidad:** archivo facilitado por el Global Earthquake Model a partir de un estudio por Martins y Silva que describe las curvas de vulnerabilidad para las tipologías que se definieron para las edificaciones de la zona de estudio en el Centro Histórico.
- **Parámetros de cálculo:** Los cálculos se realizaron por medio de un árbol lógico de ecuaciones de atenuación, el modelo de atenuación JB2009, un nivel de truncamiento 3 para obtener cálculos por variabilidad y una distancia de estudio de 300 km.

5.4. Mapa de pérdidas estructurales por edificio

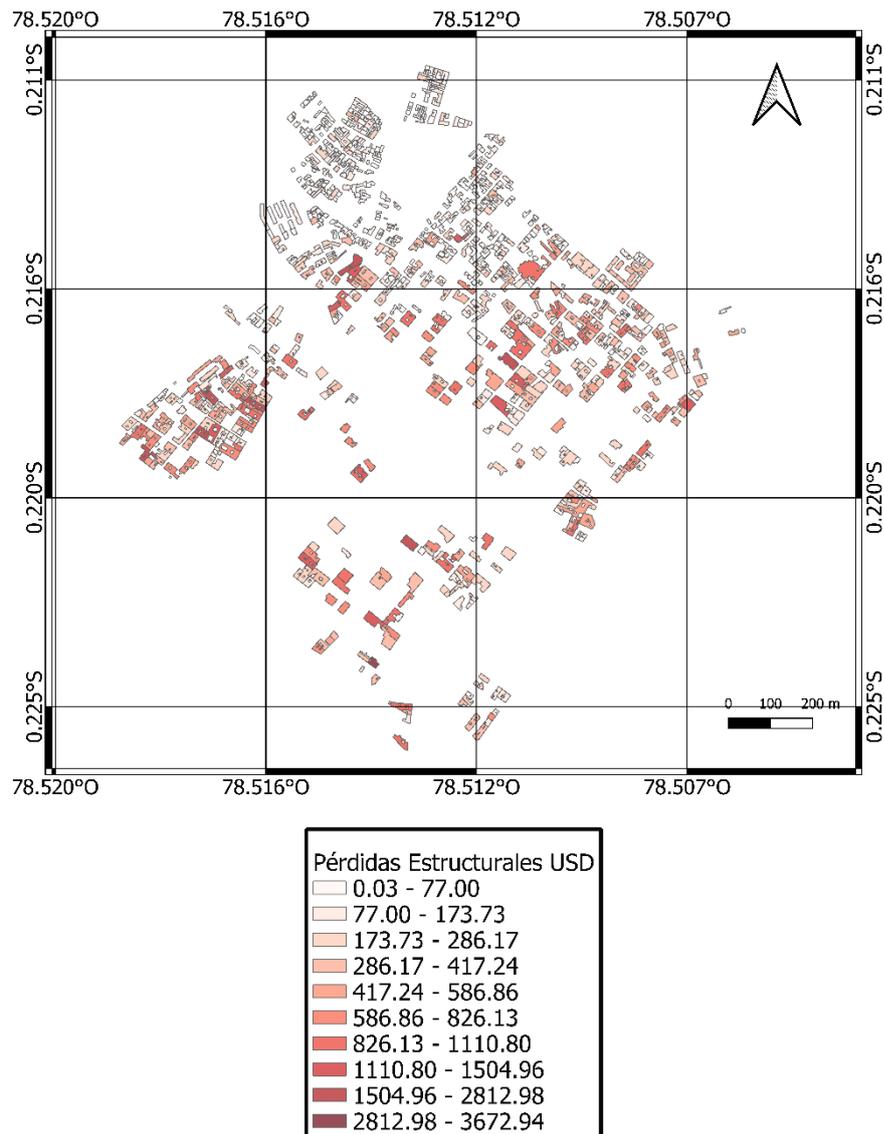


Figura 22. Pérdidas estructurales en USD en el CHQ

La Figura 22 muestra las pérdidas estructurales esperadas para la zona de estudio en el Centro Histórico de Quito a partir de la estimación de los daños estructurales calculados para el riesgo sísmico utilizando la plataforma de OpenQuake; estos cálculos se realizaron para cada una de las residencias definidas en el modelo de exposición.

Como se puede observar en la figura, existe una zona cuyas coordenadas son (78.516°O,78.512°O,0.216°S,0.211°S) en donde las pérdidas son mínimas; esta zona se

identificó en la etapa de exposición como edificaciones de sistemas de resistencias laterales tipo pórticos y de material de construcción en su mayoría de bloque de concreto.

Según el mapa de pérdidas estructurales se puede observar que no existe una zona en particular donde existan la mayor cantidad de pérdidas, de hecho, las edificaciones de mayores pérdidas se encuentran dispersas en toda el área de estudio.

Tabla 7. Pérdidas totales esperadas [USD]

[AkkarBommer2010]	[BooreAtkinson2008]	[ZhaoEtAl2006Asc]
288,283 USD	138,053 USD	225,556 USD

En la Tabla 6 se muestran las pérdidas calculadas para cada una de las ecuaciones de atenuación utilizadas en este estudio de riesgo sísmico. Es evidente que los modelos que presentan mayores pérdidas son AkkarBommer2010 y ZhaoEtAl2006Asc. A comparación el modelo AkkarBommer2010 presentaba también la aceleración de terreno entre los tres modelos en los mapas de movimiento de terreno.

5.5. Tipologías constructivas de mayor pérdida

Tabla 8. Designación de tipologías

Tipo	Tipología
Tipo1	CR_LFINF-DUL_H3
Tipo2	CR_LFINF-DUM_H2
Tipo3	CR_LFINF-DUM_H3
Tipo4	CR_LFINF-DUM_H5
Tipo5	CR_LFINF-DUM_H6
Tipo6	CR_LFM-DUM_H3
Tipo7	CR_LFM-DUM_H4
Tipo8	CR_LWAL-DUL_H1
Tipo9	MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H1
Tipo10	MUR_SAmerica_LWAL-DNO_H3
Tipo11	MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2
Tipo12	MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H3

Para el Centro Histórico de Quito se definieron las tipologías correspondientes del modelo de exposición según la nomenclatura de GEM y fueron designadas para cada edificación a partir de sus características determinadas en el modelo de exposición en donde se definieron factores clave como son: el material de construcción, el sistema de resistencia lateral, el nivel de ductilidad y el número de pisos. Estos parámetros se utilizaron para asignar una tipología apropiada a partir de las curvas de vulnerabilidad realizadas por Martins y Silva.

A continuación, se muestran las tipologías con sus correspondientes porcentajes de pérdidas según los resultados del modelo de atenuación de movimiento AkkarBommer2010.

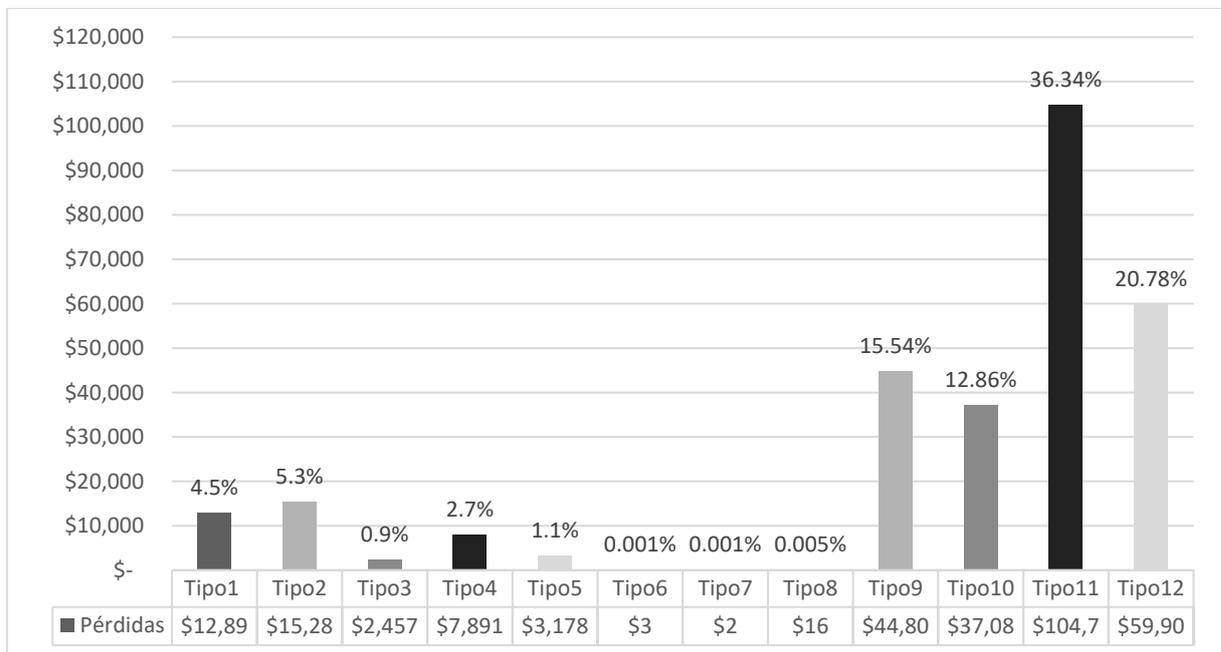


Figura 23. Pérdidas estructurales según la tipología

La Figura 23 demuestra que para este estudio de riesgo sísmico las tipologías que presentan mayores pérdidas en las predicciones son: tipo 9, tipo 10, tipo 11 y tipo 12. Estas tipologías corresponden a estructuras de un sistema de resistencia lateral de mampostería no confinada, no reforzada, para edificios de alturas bajas con materiales de construcción de adobe y ladrillo para estructuras no dúctiles.

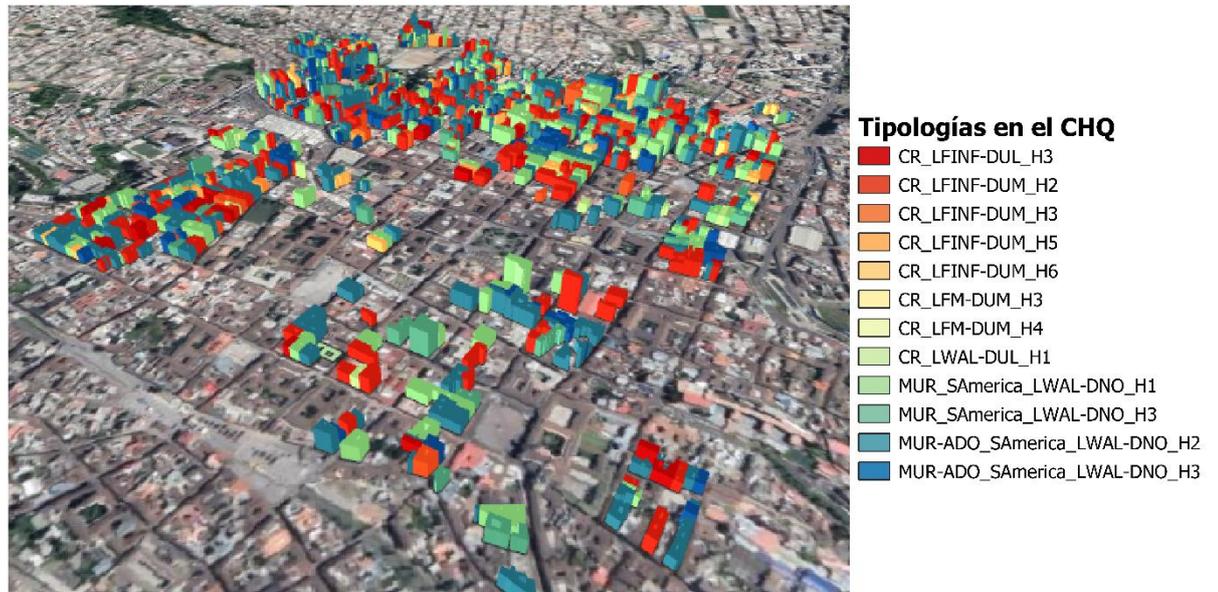


Figura 24. Mapa de Tipologías de las edificaciones del CHQ

A comparación entre los tres modelos se determina que la tipología con mayor porcentaje de pérdidas es MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2 o Tipo 11, con un porcentaje total de 36.34% para el modelo de *AkkarBommer2010*. Esta tipología es asignada a aquellas estructuras de mampostería no confinada y no reforzada, hecha de un material de construcción de adobe y es un sistema de pared no dúctil para edificaciones de baja altura. La curva de vulnerabilidad que describe esta tipología se muestra a continuación:

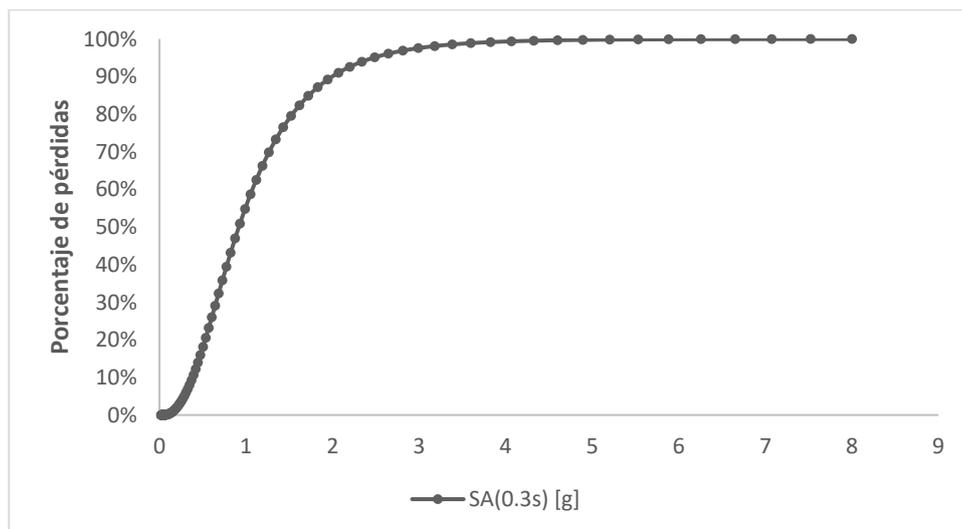


Figura 25. Curva de vulnerabilidad de MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2 (Martins & Silva, 2020)

A partir de esta curva se puede observar que para una intensidad baja el porcentaje de pérdidas también disminuye, sin embargo, esta curva presenta una curva más inclinada para intensidades de rangos entre 0-2g. Este comportamiento demuestra que incluso a bajas intensidades, la probabilidad de pérdidas se incrementa rápidamente debido al uso de material de adobe en mampostería no confinada que es uno de los sistemas de construcción más vulnerables para una vivienda como consecuencia de la fragilidad del material de construcción y por la carga de peso propio elevada.



Figura 26. Vivienda de tipología 11

5.6. Tipología constructiva de menor pérdida.

La tipología con menor porcentaje de pérdidas es CR_LFM-DUM_H4 o Tipo 8, con un porcentaje total de 0.001% para el modelo de *AkkarBommer2010*. Esta tipología es asignada a edificios de material de construcción de concreto reforzado de sistemas de pórticos resistentes a momentos de ductilidad media. La curva de vulnerabilidad que describe esta tipología se muestra a continuación:

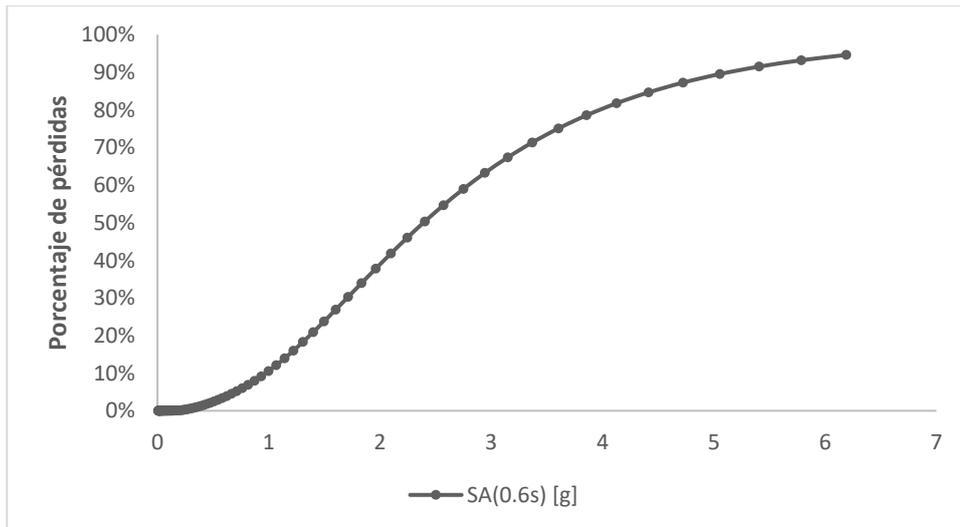


Figura 27. Curva de vulnerabilidad de CR_LFM-DUM_H4 (Martins & Silva, 2020)

Al comparar, esta curva de vulnerabilidad con la curva de MUR-ADO_SAmerica_LWAL-DNO_H2 se evidencia que el porcentaje de pérdidas no incrementa tan rápidamente con la intensidad como lo hace la de un sistema de adobe de muro no confinado. Este comportamiento demuestra que el uso de un sistema de resistencia a momento de material de construcción de concreto reforzado genera menores porcentajes de pérdidas en las estructuras del Centro Histórico. Desafortunadamente, este tipo de construcción solo se usa en un 30.7 % de las viviendas a diferencia del 68.2% de viviendas que solo usa muro no reforzado por lo moradores de la zona incrementando la vulnerabilidad de las viviendas del Centro Histórico.



Figura 28. Vivienda de tipología CR_LFM-DUM_H4

5.7.Comparación de pérdidas

Las pérdidas estructurales obtenidas para un estudio de riesgo sísmico en el Centro Histórico de Quito estimado utilizando un evento similar al de Pomasqui en agosto de 1990 muestra pérdidas de 288,283.25 USD para el caso del GMPEs de AkkarBommer2010.

Las pérdidas por reparación para el sismo de Pomasqui se calcularon en 770 millones de sucres para el año de 1990 (IGEPN, 2011), cifra que en USD actuales son aproximadamente 65 mil dólares. A comparación, las pérdidas estructurales que se generan en el Centro Histórico de Quito son 4.5 veces superiores a las que se obtuvieron en Pomasqui en 1990, posiblemente como resultado del mayor número de estructuras que existen en el Centro Histórico con tipologías de alta vulnerabilidad.

CONCLUSIONES

- A partir del estudio de riesgo sísmico se obtiene como resultado para la modelación del sismo del 11 de agosto de 1990 en el Centro Histórico de Quito, unas pérdidas estructurales de un total de 288,283.25 USD, cifra que supera en más de 4.5 veces las pérdidas que se obtuvieron en el sismo de agosto de 1990 de Pomasqui.
- En el estudio de riesgo sísmico se determina que la tipología con mayor porcentaje de pérdidas estructurales en el Centro Histórico de Quito es la que corresponde edificios de 2 pisos y un uso de material de adobe para su construcción junto con un sistema de resistencia lateral de muro de mampostería no confinada cuyo desempeño frente a la carga sísmica es poco efectiva debido a su tendencia de generar más pérdidas por su alta vulnerabilidad en la fragilidad del material de construcción.
- Las tipologías con las que se obtienen el 50% de las pérdidas estructurales totales son las que corresponden a edificaciones entre 2 a 3 pisos, con un material de construcción de adobe y un sistema de resistencia lateral de muro de mampostería no confinada de características no dúctiles.
- En el modelo de exposición de la zona de estudio, se determina que el tipo de vivienda residencial según la ocupación con mayor porcentaje es la residencia unifamiliar con un porcentaje del 27%, el material de construcción más común es el ladrillo con 41.2%, la altura de las estructuras predominante corresponde a viviendas de 2 pisos con un 49.8% y el sistema de resistencia lateral mas utilizado es el muro con un porcentaje del 68.2%.
- En el modelo de amenaza sísmica se determina que la ecuación de atenuación que mejor representa el movimiento de terreno es el modelo por mediana de AkkarBommer2010 obtiene un error de 11.1%. Este modelo presenta unas

aceleraciones máximas de 0.05 g cuya ubicación se presenta predominantemente en la zona norte del área de estudio.

- Durante el desarrollo del modelo de exposición se observa edificaciones de carácter mixto en el material de construcción. Estas se refieren a que se han construidos nuevos pisos superiores utilizando materiales diferentes al de la edificación original, lo que puede formar puntos de debilidad en la resistencia del edificio al agregar más peso sobre la estructura original y al formar un cambio de rigidez brusco de piso a piso.
- Los resultados de riesgo son meramente para pérdidas de estructuras de carácter residencial. Las estructuras de carácter comercial y cultural también son un porcentaje alto de las edificaciones que conforman el Centro Histórico de Quito (44%). Por lo tanto, es recomendable implementar atención en su reforzamiento frente a un evento sísmico debido a su invaluable valor histórico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

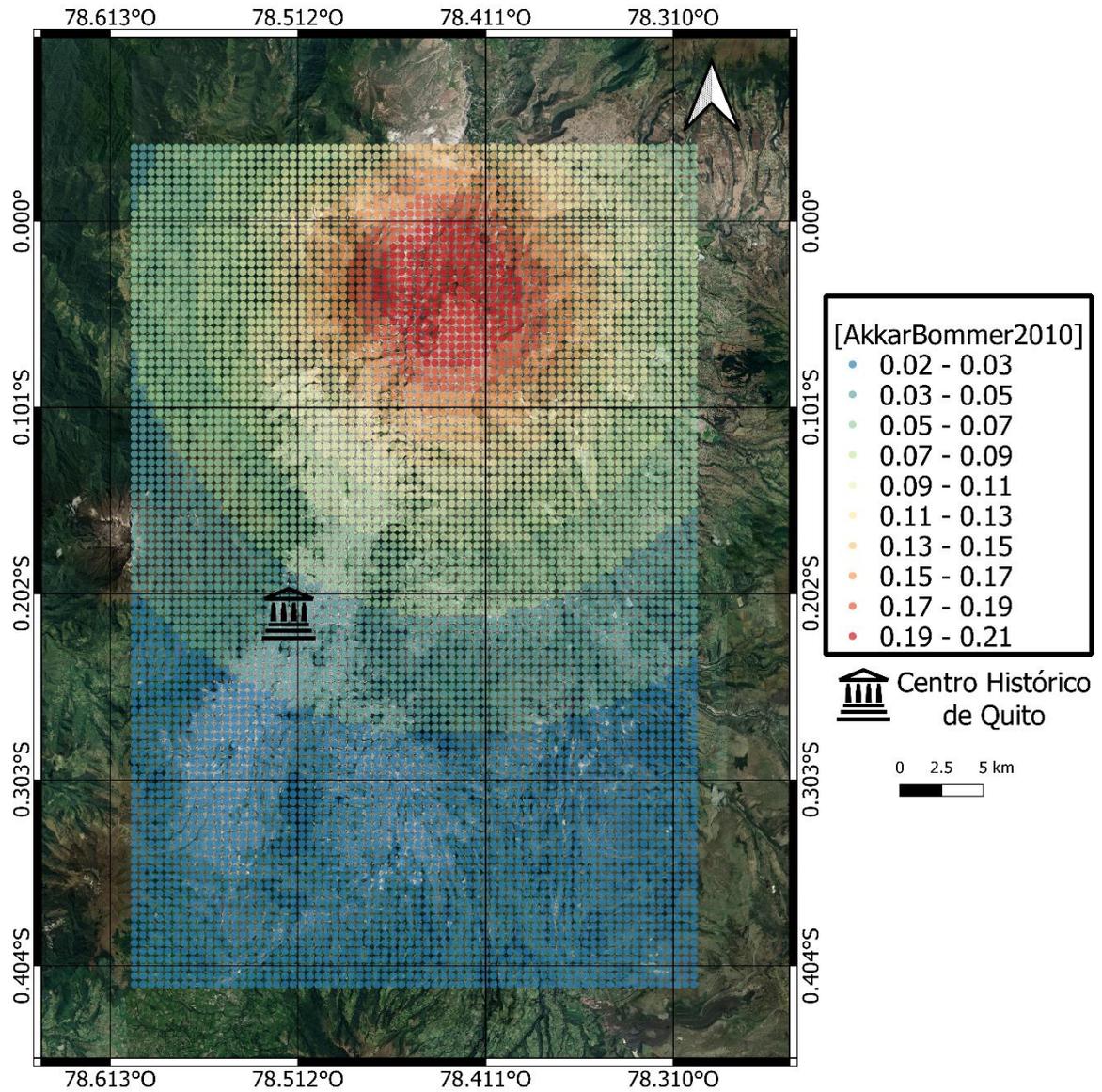
- Gerstenberger, M., Marzocchi, W., Allen, T., Pagani, M., Adams, J., Danciu, L., . . . Petersen, M. (2020). Probabilistic Seismic Hazard Analysis at Regional and National Scale: State of the Art and Future Challenges. *Reviews of Geophysics*, 58(2). doi:10.1029/2019RG000653
- Aguiar, R., Rivas-Medina, A., Caiza, P., & Quizanga, D. (2017). Control spectra for Quito. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 17(3), 397-407.
- Altamirano, F., & Martínez, D. (2015). *Identificación De Sectores Vulnerables Pos Acción Sísmica Y Elaboración Del Mapa De Respuestas Máximas Estructurales De La Zona Centro Del DMQ*. Quito.
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrín, P., . . . Cisneros, D. (2016). Partitioning of oblique convergence in the Northern Andes subduction zone: Migration history and the present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador. *Tectonics*, 35(5), 1048-1065.
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., . . . Quidelleur, X. (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*, 10.1002/2012TC003224.
- Baikerikar, A. (2014). Study Of Lateral Load Resisting Systems At Variable Heights. *ResearchGate*. doi:10.13140/RG.2.2.34590.64320
- Baker, J. (2008). *An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)*.
- Beauval, C., Yepes, 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(6), 1316-1327.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W. H., Egred, J., Alvarado, A., & Singaicho, J. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587–1996). *Geophysical Journal International*, 181(3), 1613–1633.
- Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A. W., Allen, L., Greene, M., Jaiswal, K., & Silva, V. (2013). *GEM Building Taxonomy (Version 2.0)*. GEM Foundation.
- CAMICON. (2020). *Quito, el cantón más poblado del Ecuador en el 2020*. Recuperado el 28 de septiembre de 2020, de <https://www.camicon.ec/la-camara-quito-el-canton-mas-poblado-del-ecuador-en-el-2020/#:~:text=Para%20el%202018%2C%20Quito%20contaba,16%20%25%20de%20la%20poblaci%C3%B3n%20nacional>.
- Cañizares, F. (2017). *Selección de ecuaciones de atenuación (GMPEs) compatibles con el sistema de fallas de Quito*. Quito.

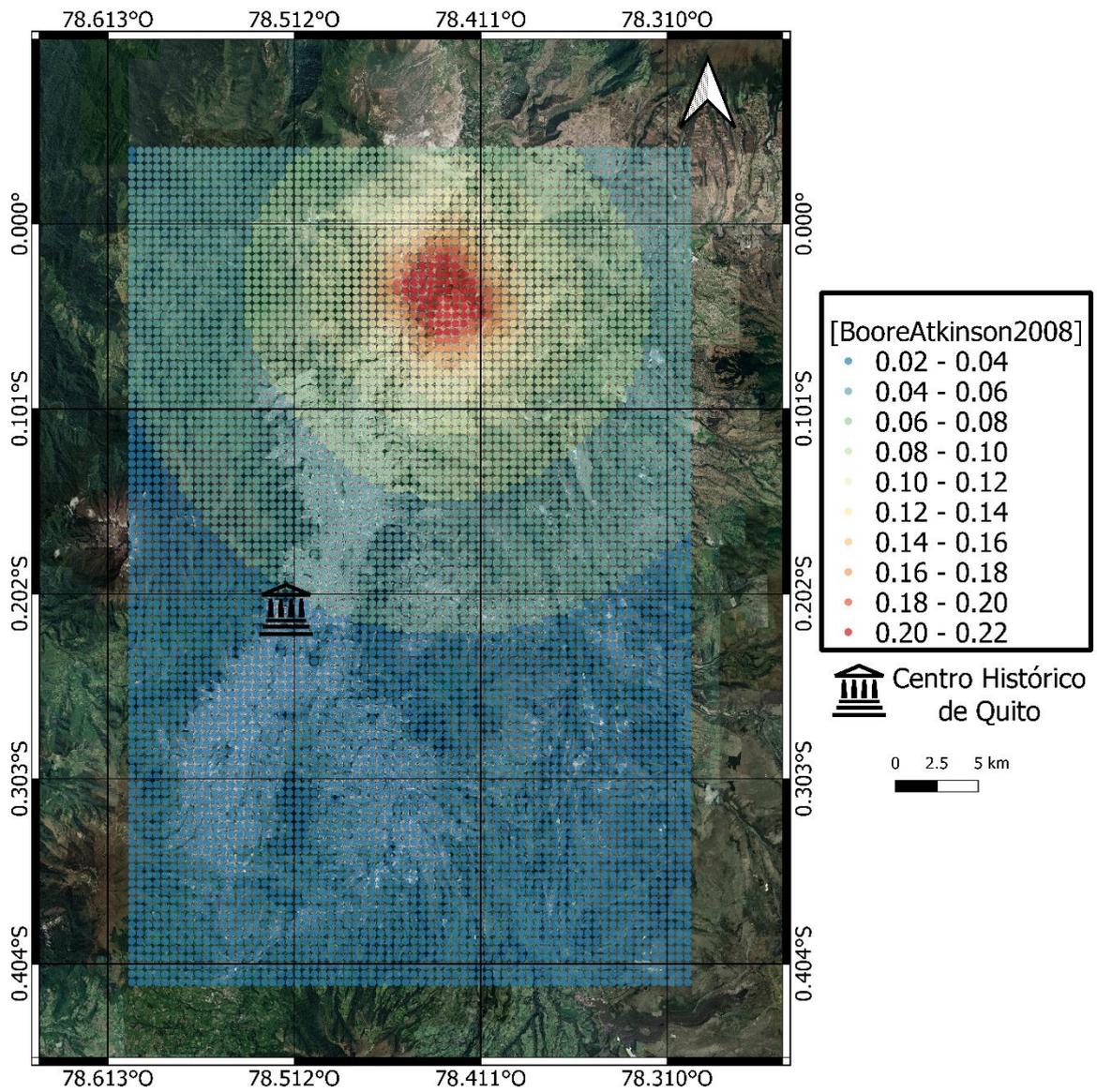
- Chatelain, J. L., Tucker, B., Guillier, B., Kaneko, F., Yepes, H., Fernandez, J., . . . Yamada, T. (1999). Earthquake risk management pilot project in Quito, Ecuador. *GeoJournal*, 49(2), 185-196.
- FEMA. (2019). *Unreinforced Masonry Buildings and Earthquakes*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de fema.gov/media-library-data/20130726-1728-25045-2959/femap774.pdf
- Garcia, J., Weatherhill, G., Pagani, M., Rodriguez, L., & Poggi, V. (2017). Building and Open Seismic Hazard Model for South America: The SARA-PSHA Model. *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*, 9, p. 13.
- GEM. (2020). *Escenarios sísmicos. Módulo II*. Obtenido de Training OpenQuake.
- GEM. (s.f.). *Concrete, reinforced [CR]*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://taxonomy.openquake.org/terms/concrete-reinforced-cr>
- GEM. (s.f.). *Fired clay solid bricks [CLBRS]*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://taxonomy.openquake.org/terms/fired-clay-solid-bricks-clbrs>
- GEM. (s.f.). *Masonry, unreinforced [MUR]*. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de taxonomy.openquake.org/terms/masonry-unreinforced-mur
- Gunes , B., Cosgun, T., Sayin, B., & Magir , A. (2019). Seismic performance of an existing low-rise RC building considering the addition of a new storey. *Revista de la construcción*, 18 (3), 459-475.
- Hanna , S. C. (2017). El Centro Histórico de Quito en la planificación urbana (1 942-1 992). Discursos patrimoniales, cambios espaciales y desplazamientos socioculturales. *Territorios*(36), 189-215.
- IGEPN. (2011). *Sismo De Pomasquí-10 de agosto de 1990*. Obtenido de IGEPN: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/466-sismo-de-pomasqu%C3%AD-10-de-agosto-de-1990#:~:text=El%2010%20de%20agosto%20de,al%20Noreste%20del%20aeropuerto%20de>
- IGM. (2013). *Proyecto Interinstitucional Para Monitoreo De Terremotos Y Tsunamis*. Obtenido de Instituto Geográfico Militar: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/825-proyecto-interinstitucional-para-monitoreo-de-terremotos-y-tsunamis>
- Instituto de la Ciudad. (2016). *Informe Metodológico Encuesta Multipropósito DMQ*. Quito : Instituto de la Ciudad .
- Instituto de la Ciudad. (2017). *Encuesta Multipropósito en el CHQ*. Obtenido de <http://institutodelaciudad.com.ec/informacion-estadistica/182-encuesta-multiproposito-en-el-chq.html>
- IRIS Earthquake Science. (2015). Buildings in Earthquakes: Why do some fall and others don't? Portland. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=6IJ99phNArM&ab_channel=Fran%C3%A7oisTilquin

- Lara , A. (2015). La Construcción Tradicional Y Su Vulnerabilidad Sísmica “El Caso De Quito Y Sus Construcciones Con Valor Patrimonial”. *CONPAT*, 9-10.
- Martínez, J. A., León, J. A., Hernández, E., Rojas, R., Sánchez, J., & Mina, R. (2017). Amenaza Sísmica, Microzonificación Sísmica Y Espectros De Diseño De La Ciudad De Pedernales, Manabí, Ecuador.
- Martins, L., & Silva, V. (2020). Development of a fragility and vulnerability model for global seismic risk analyses. *Bull. Earthq. Eng.*
- Mohiuddin, A. K. (2013). *Earthquake-Resistant Structures: Design Build, and Retrofit*. Butterworth-Heinemann.
- Municipio de Quito. (2012). *Plan de Desarrollo 2012-2022*. Quito: Municipio de Quito.
- NEC-SE-DS. (2015). *Cargas Sísmicas, Diseño Sismo Resistente*. Quito: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- Singaucho, J. C. (2009). *Mapa De Máximas Intensidades Sísmicas Del Ecuador. Criterios Estructurales Para Mejorar La Estimación De Intensidades. Proyecto de Titulación, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional*.
- Yamin, L., Ghesquiere, F., Cardona, O. D., Ordaz, M., & Ordaz, M. G. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre*. Banco Mundial, Universidad de Los Andes.

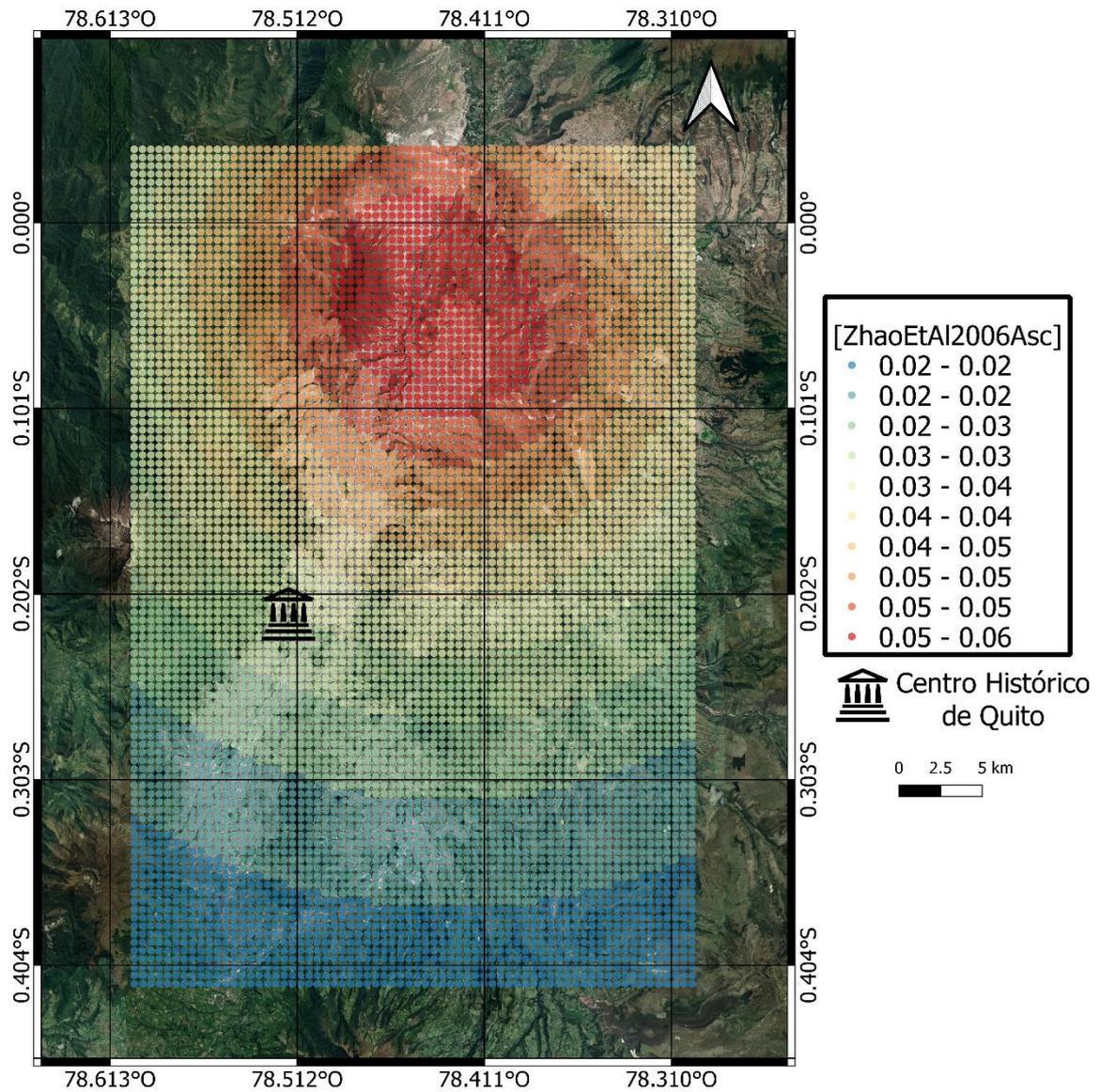
ANEXO A: RUPTURA EN EL EPICENTRO DE FALLA TRUNCAMIENTO 0. GMPE

AKKARBOMMER2010



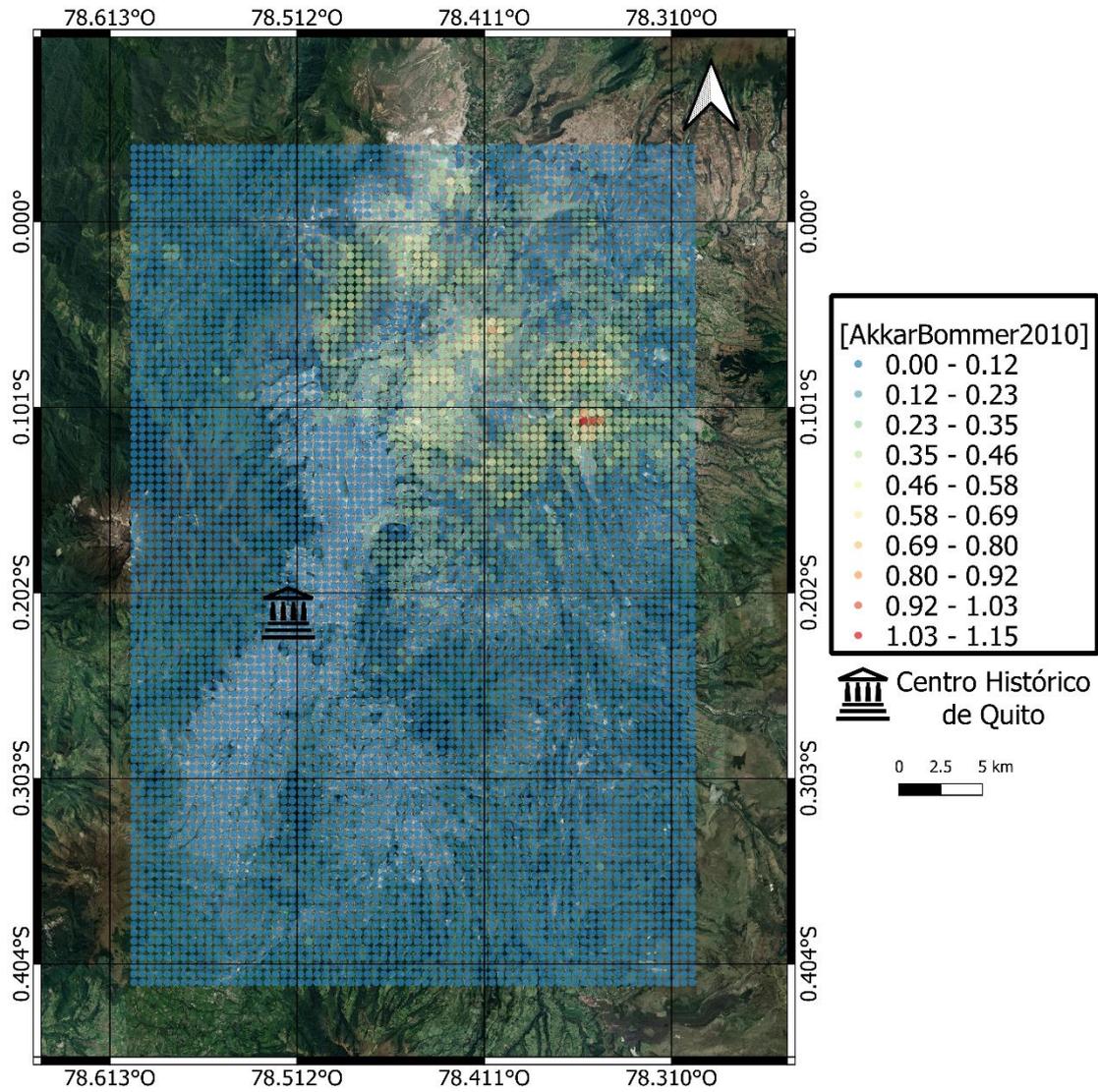
ANEXO B: RUPTURA EN EL EPICENTRO DE FALLA TRUNCAMIENTO 0. GMPE**BOOREATKINSON2008**

ANEXO C: RUPTURA EN EL EPICENTRO DE FALLA TRUNCAMIENTO 0. GMPE ZHAOETAL2006ASC



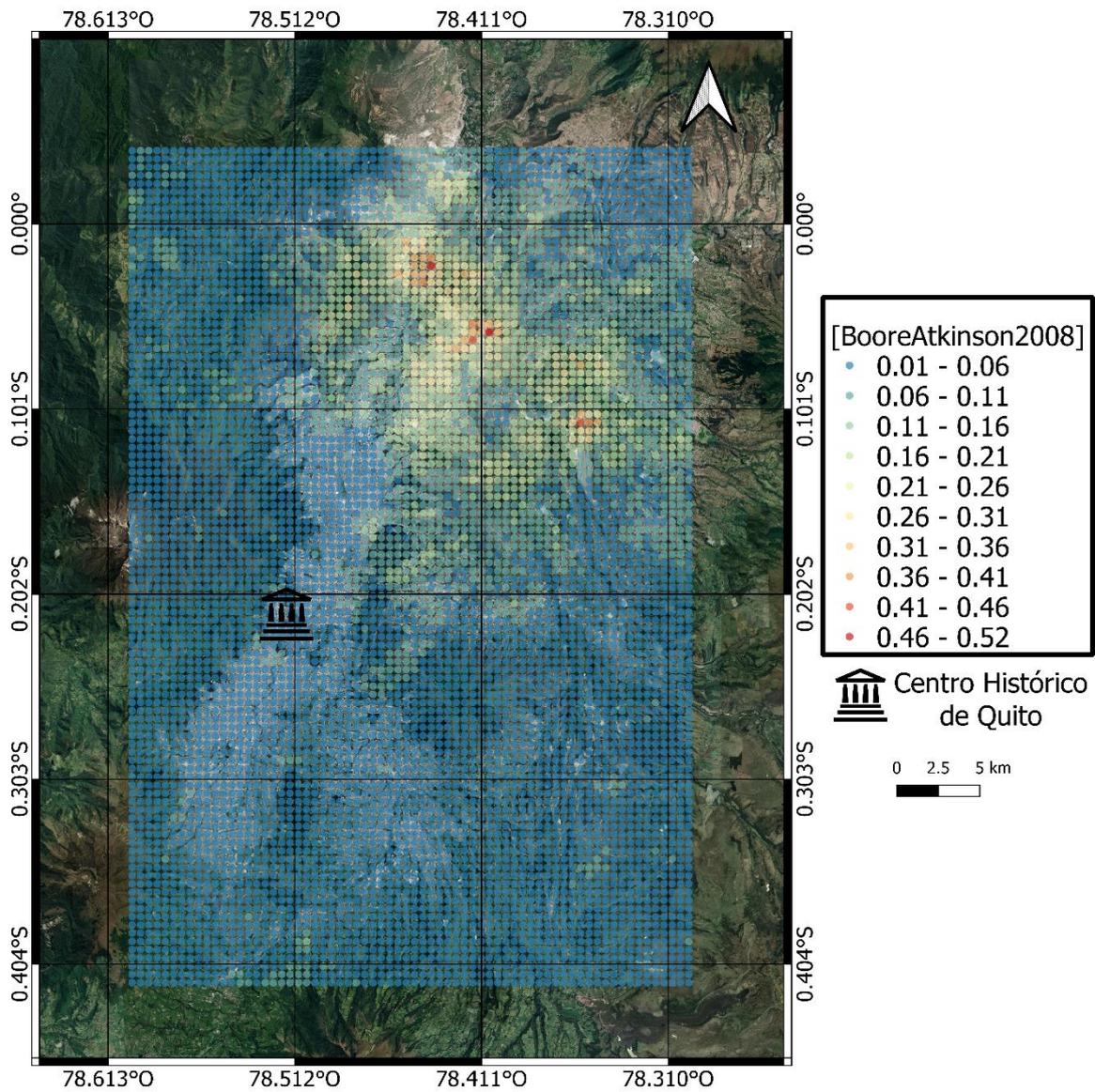
ANEXO D: RUPTURA EN EL EPICENTRO DE FALLA TRUNCAMIENTO 3. GMPE

AKKARBOMMER2010



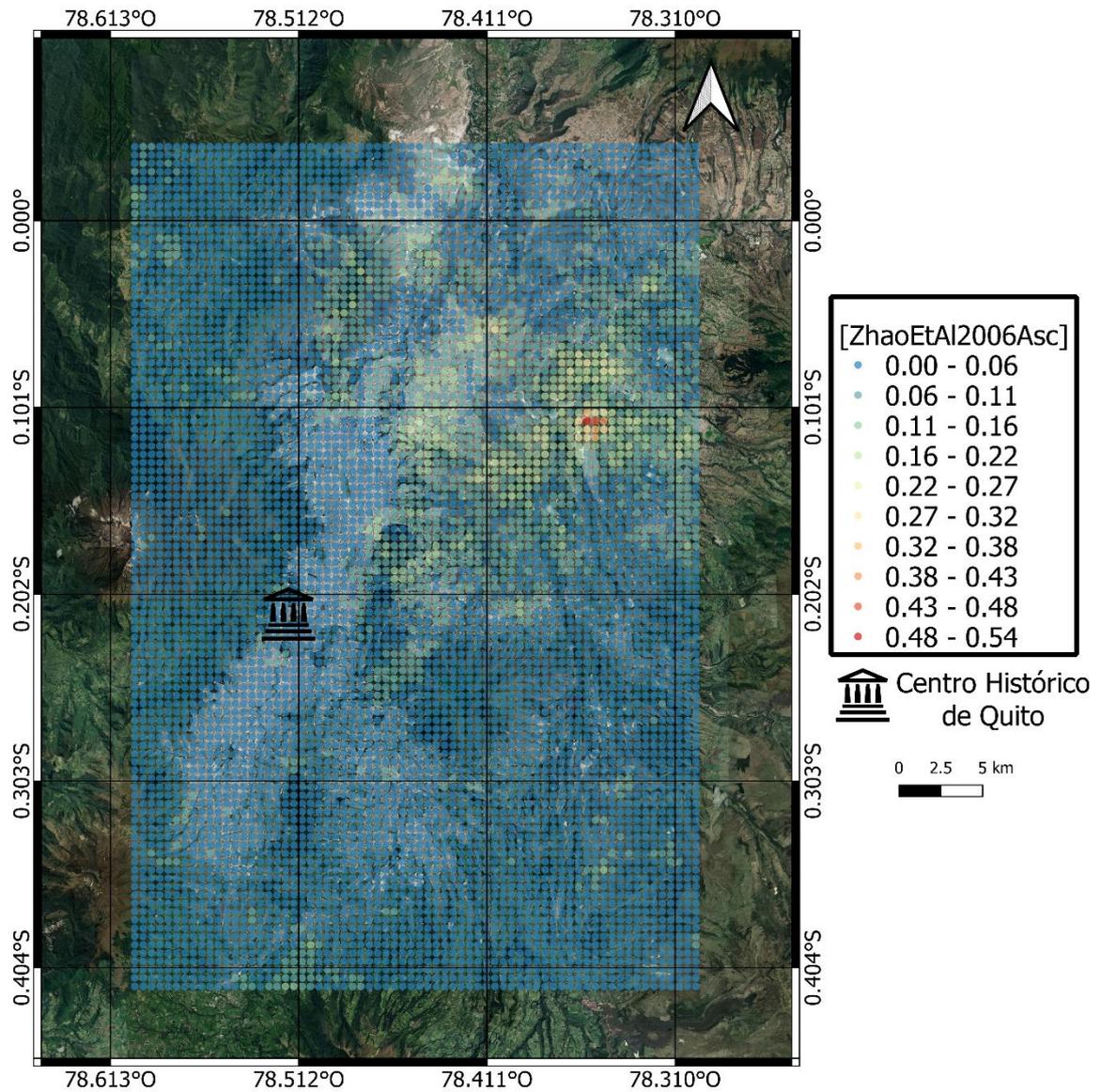
ANEXO E: RUPTURA EN EL EPICENTRO DE FALLA TRUNCAMIENTO 3. GMPE

BOOREATKINSON2008



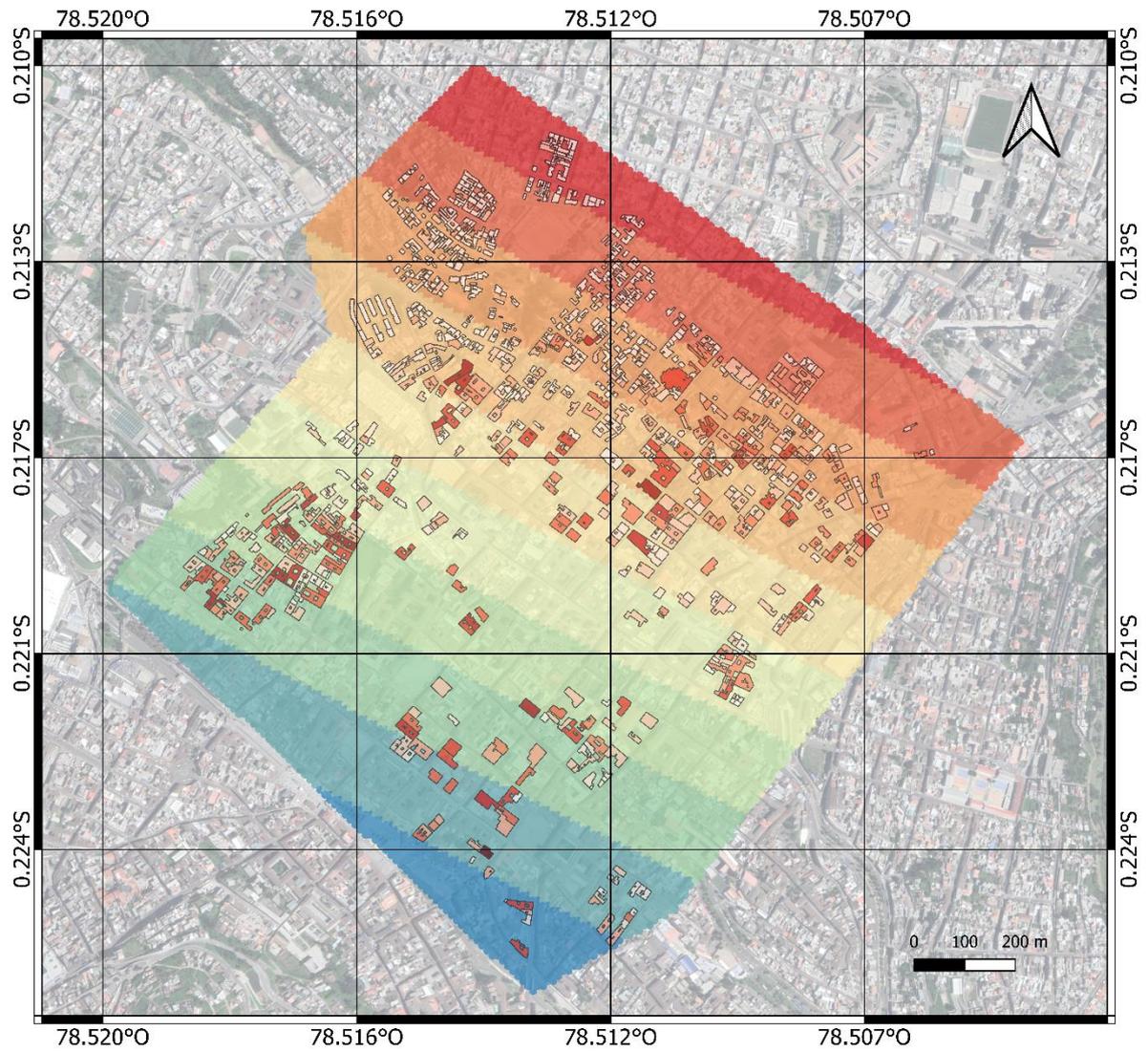
ANEXO F: RUPTURA EN EL EPICENTRO DE FALLA TRUNCAMIENTO 3. GMPE

ZHAOETAL2006ASC



ANEXO G: RUPTURA EN EL CHQ TRUNCAMIENTO 0. GMPE

AKKARBOMMER2010

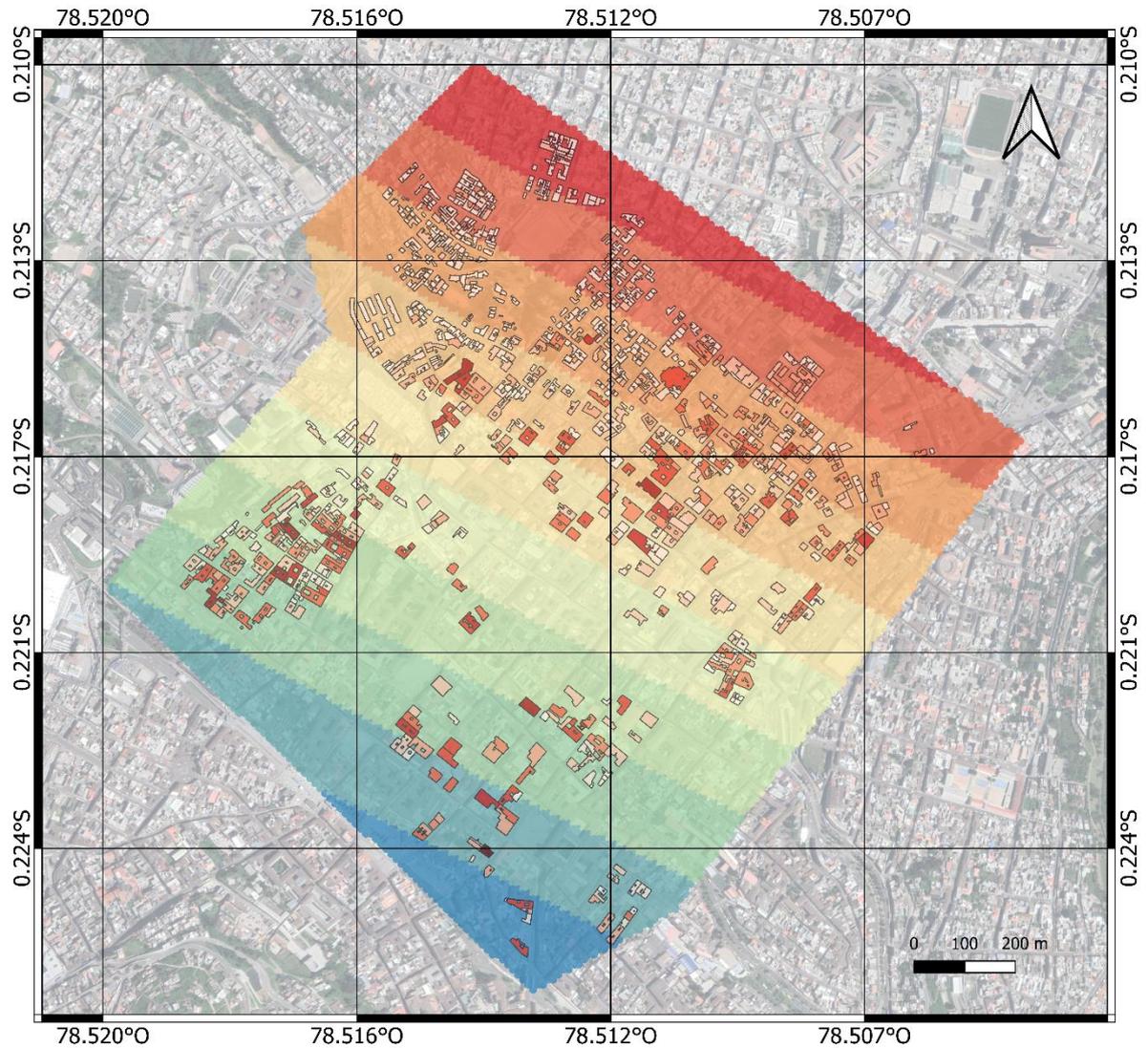


[AkkarBommer2010]

- 0.04 - 0.04
- 0.04 - 0.04
- 0.04 - 0.04
- 0.04 - 0.04
- 0.04 - 0.05
- 0.05 - 0.05
- 0.05 - 0.05
- 0.05 - 0.05
- 0.05 - 0.05
- 0.05 - 0.05

ANEXO H: RUPTURA EN EL CHQ TRUNCAMIENTO 0. GMPE

BOOREATKINSON2008

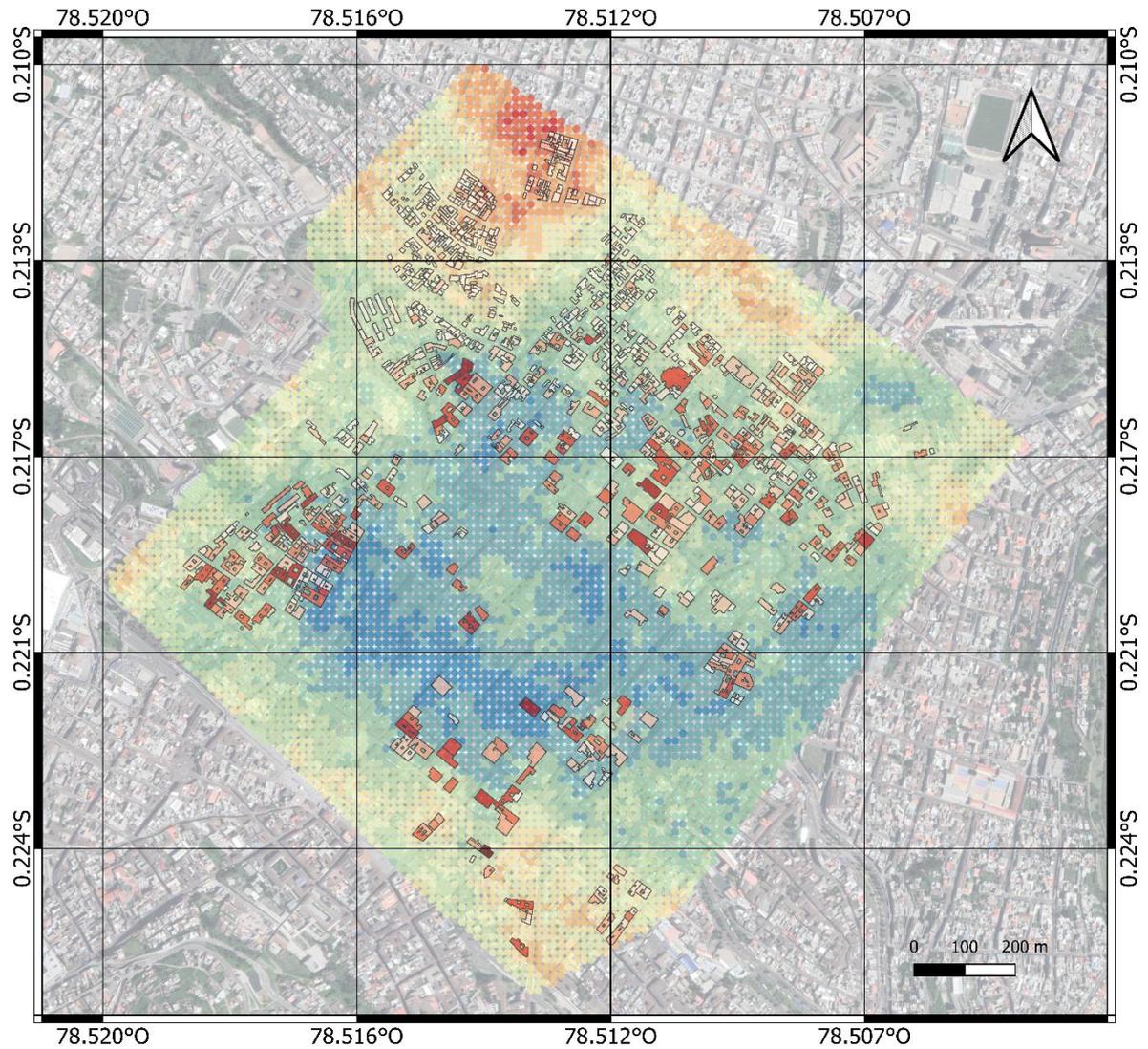


[BooreAtkinson2008]

- 0.03 - 0.03
- 0.03 - 0.03
- 0.03 - 0.03
- 0.03 - 0.03
- 0.03 - 0.03
- 0.03 - 0.03
- 0.03 - 0.04
- 0.04 - 0.04
- 0.04 - 0.04
- 0.04 - 0.04

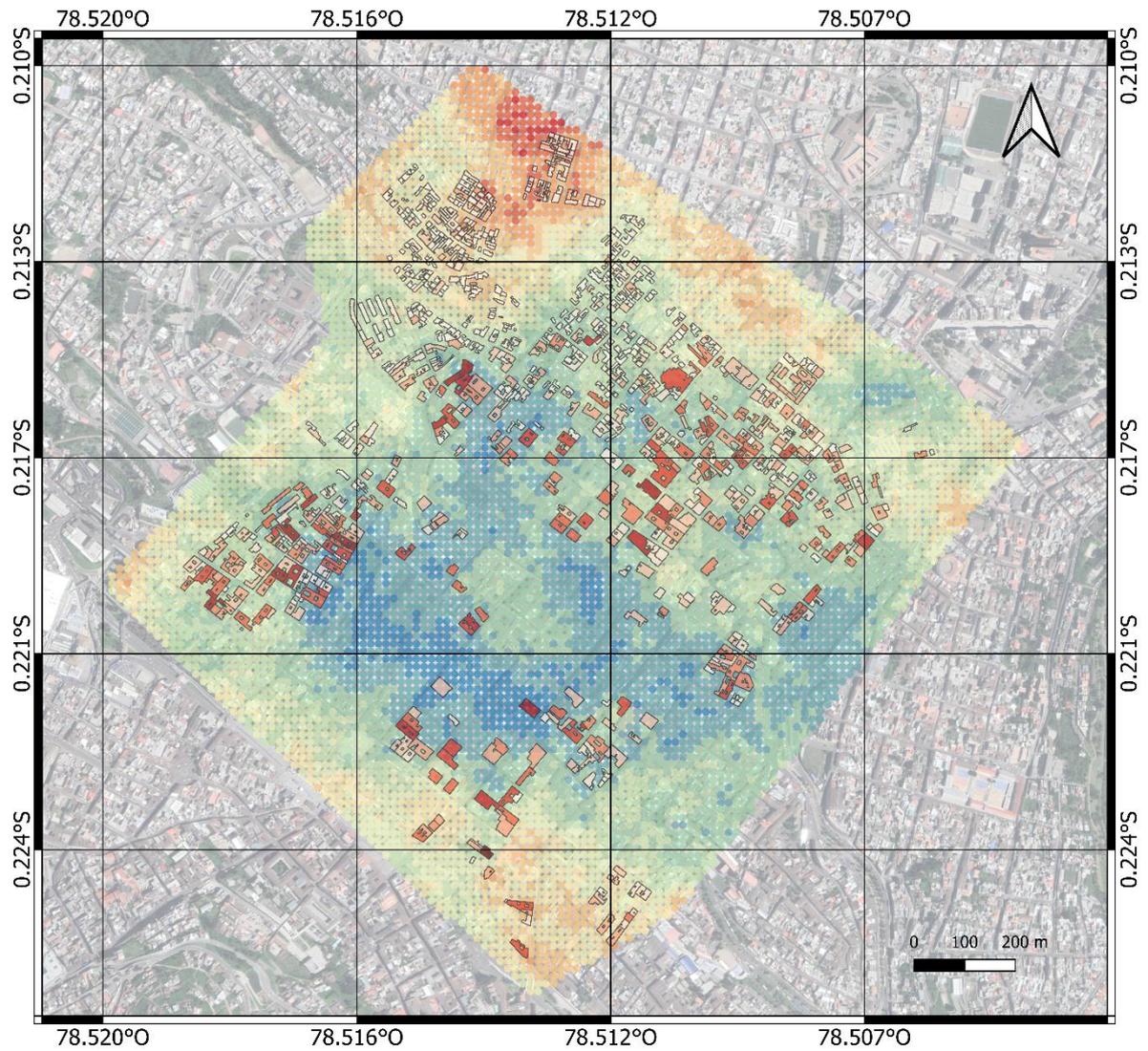
ANEXO J: RUPTURA EN EL CHQ TRUNCAMIENTO 3. GMPE

AKKARBOMMER2010



ANEXO K: RUPTURA EN EL CHQ TRUNCAMIENTO 3. GMPE

BOOREATKINSON2008

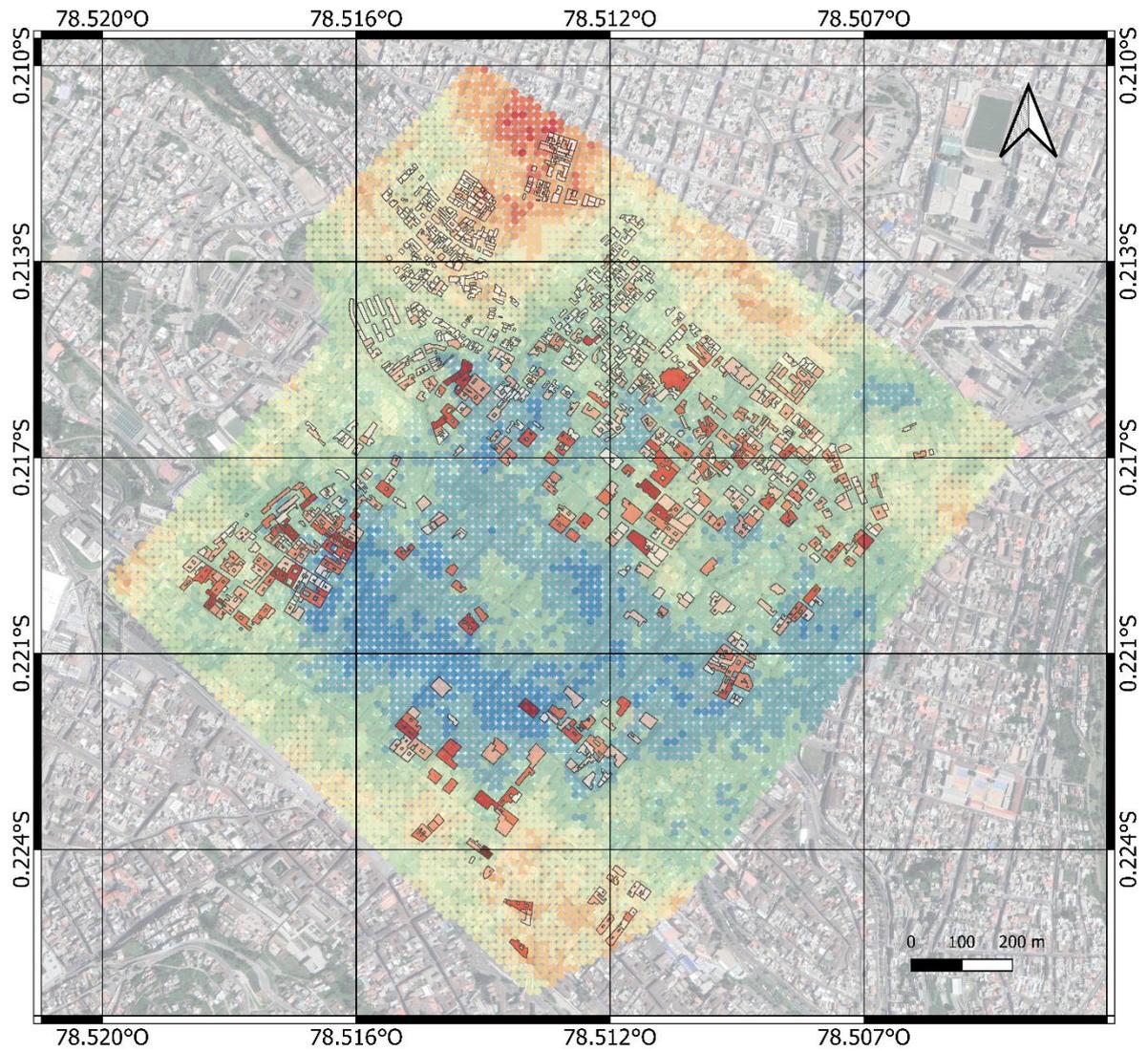


[BooreAtkinson2008]

- 0.02 - 0.02
- 0.02 - 0.03
- 0.03 - 0.03
- 0.03 - 0.03
- 0.03 - 0.04
- 0.04 - 0.04
- 0.04 - 0.04
- 0.04 - 0.05
- 0.05 - 0.05
- 0.05 - 0.06

ANEXO L: RUPTURA EN EL CHQ TRUNCAMIENTO 3. GMPE

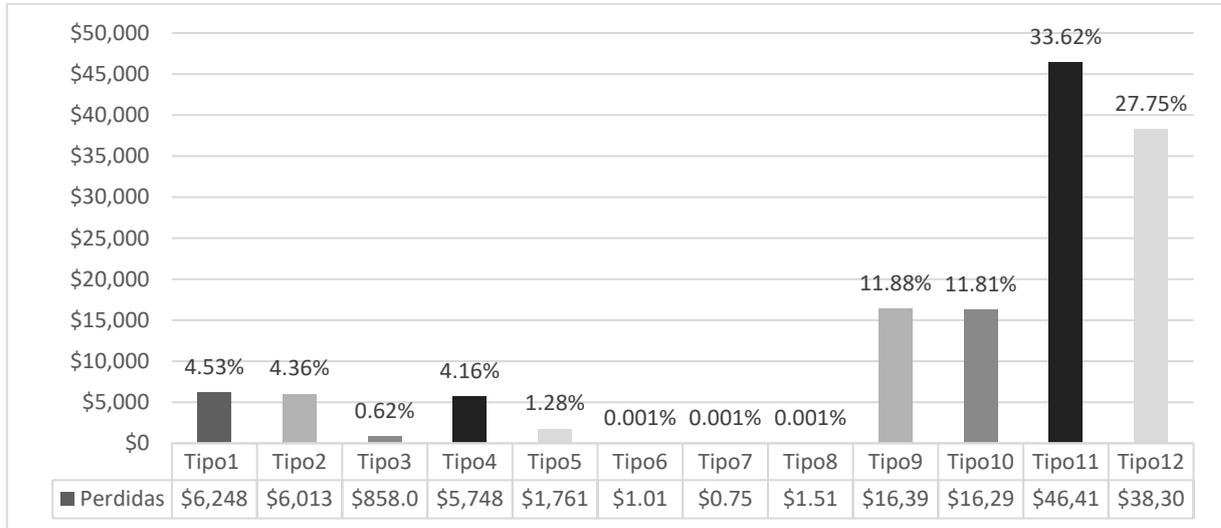
ZHAOETAL2006ASC



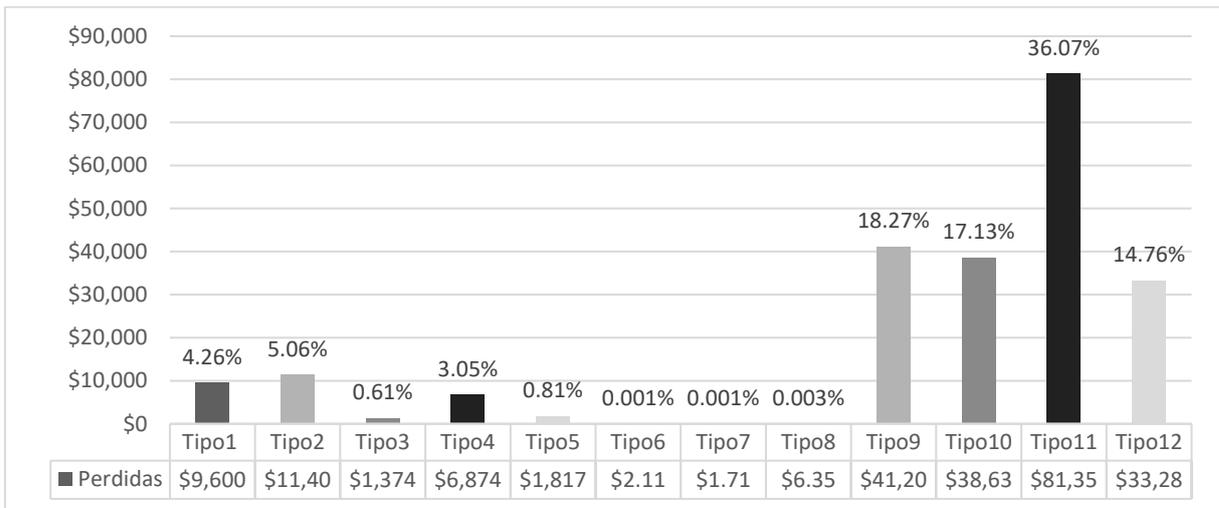
[ZhaoEtAl2006Asc]

- 0.02 - 0.02
- 0.02 - 0.02
- 0.02 - 0.03
- 0.03 - 0.03
- 0.03 - 0.04
- 0.04 - 0.04
- 0.04 - 0.05
- 0.05 - 0.05
- 0.05 - 0.05
- 0.05 - 0.06

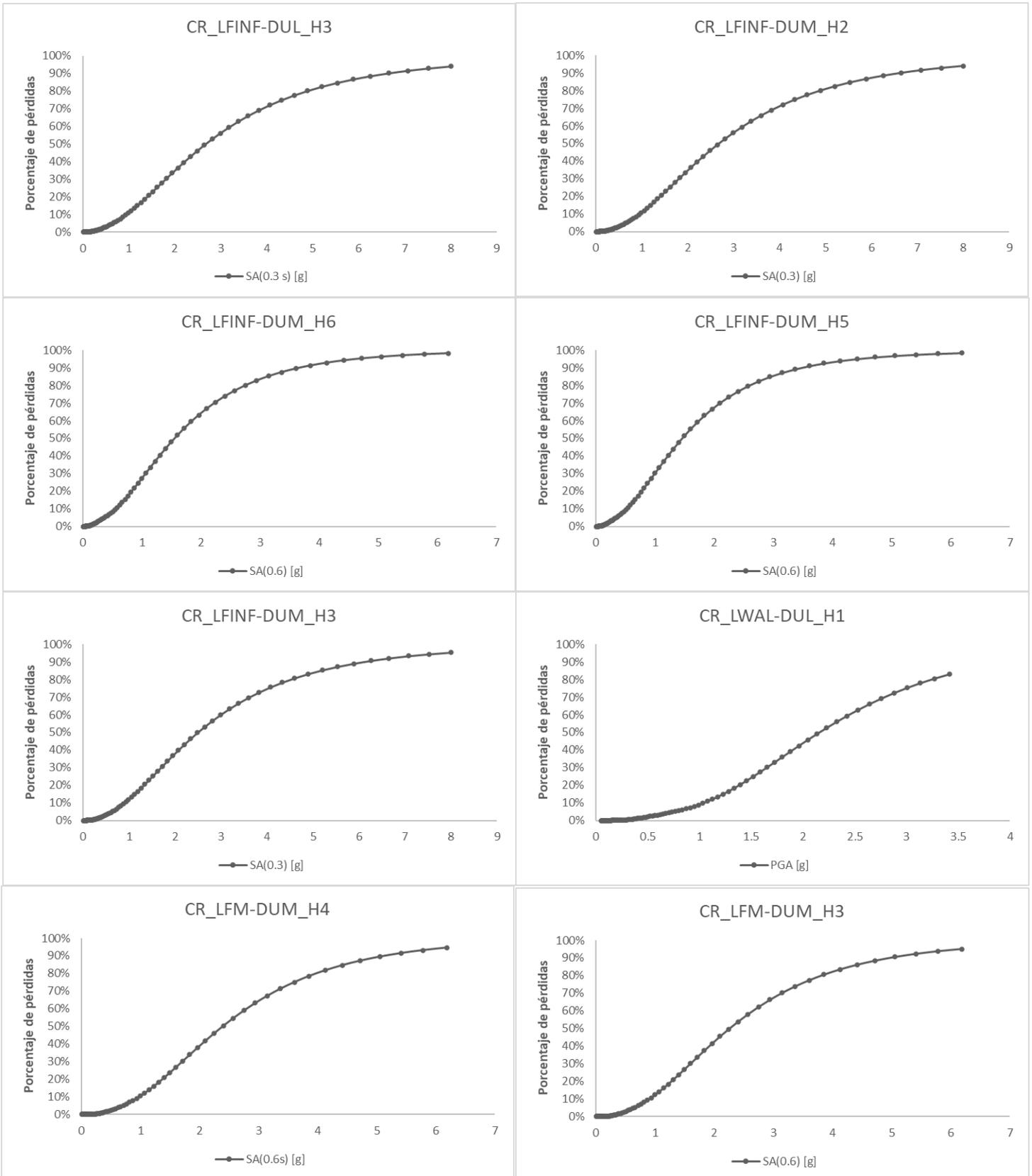
ANEXO M: PÉRDIDAS ESTRUCTURALES BOOREATKINSON2008



ANEXO N: PÉRDIDAS ESTRUCTURALES ZHAO ET AL 2006 ASC



ANEXO O: CURVAS DE VULNERABILIDAD I



ANEXO P: CURVAS DE VULNERABILIDAD II

