



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE

Secretaría de
SEGURIDAD

Por un
Quito
Digno



Pontificia Universidad
Católica del Ecuador

EPMAPS
AGUA DE QUITO

GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

Training and Communication for Earthquake Risk Assessment

TREQ Project

Evaluación de Riesgo Sísmico para el Distrito Metropolitano de Quito

Entregable 2.6.1 – versión 0.1.0



**Global
Earthquake
Model (GEM)
Foundation**

www.globalquakemodel.org

Evaluación del riesgo sísmico para
el Distrito Metropolitano de Quito

Evaluación del riesgo sísmico para el Distrito Metropolitano de Quito

Reporte D2.6.1

Reporte técnico producido en el contexto del proyecto TREQ

Versión 1.0.0 – Junio, 2022

Colaboradores

Nombre	Institución
Fausto Alarcón	Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS)
Irwin Álvarez	Dirección Metropolitana de Gestión del Riesgo (DMGR)
Alejandro Calderón Carpio	Fundación GEM
Carlos Andrés Celi Sánchez	Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE)
Shreyasvi Chandrasekhar	Fundación GEM
Robert Chase	United States Geological Survey (USGS)
Robin Gee	Antiguo miembro de la Fundación GEM
Kishor Jaiwal	United States Geological Survey (USGS)
Jose Marrero	Oficina de la Alcaldía
Jorge Ordóñez	Dirección Metropolitana de Gestión del Riesgo (DMGR)
Marco Pagani	Fundación GEM
Richard Styron	Fundación GEM
Hugo Yepes	Oficina de la Alcaldía
Catalina Yepes Estrada	Fundación GEM

La Dirección Metropolitana de Gestión del Riesgo de la Secretaría de Seguridad de Quito facilitó los datos necesarios para la realización de este proyecto.

Cita: Calderon A, Yepes-Estrada C, Celi C, Marrero J, Yepes H, Alarcón F, Ordoñez J (2022). Evaluación de Riesgo Sísmico para el Distrito Metropolitano de Quito. GEM-TREQ Reporte Técnico D2.6.1

Agradecimientos

Este informe hace parte del proyecto financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Oficina de Asistencia Humanitaria (BHA) para la Capacitación y Comunicación para la Evaluación del Riesgo por Terremotos (TREQ, Training and Communication for Earthquake Risk Assessment), subvención AID-OFDA-G-720FDA19GR00273. La Fundación Global Earthquake Model administra y ejecuta los recursos de USAID e implementa el proyecto en colaboración con las partes interesadas locales.

Se reconoce y agradece el esfuerzo del grupo técnico de la ciudad conformado por los autores de este documento, los cuales representan a la Secretaría Metropolitana de Gestión del Riesgo, la oficina de la Alcaldía, la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito. Su esfuerzo, interés, participación y contribución ayudaron a mejorar todos los aspectos de este proyecto.

Este informe ha sido posible gracias al apoyo y la generosidad del pueblo estadounidense a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Oficina de Asistencia Humanitaria (BHA).

Derechos y permisos

Salvo que se indique lo contrario, este trabajo está disponible bajo los términos de Creative Commons License Attribution - ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0). Puede descargar este informe y compartirlo con otras personas siempre que proporcione el crédito adecuado, pero no puede cambiarlo de ninguna manera, ni utilizarlo comercialmente.

Los puntos de vista e interpretaciones de este documento pertenecen a los autores individuales y no deben atribuirse a la Fundación GEM. En ellos también recae la responsabilidad de los datos científicos y técnicos presentados. Los autores han tenido mucho cuidado para asegurar la exactitud de la información en este informe, pero no aceptan responsabilidad por el material, ni aceptan responsabilidad por ninguna pérdida, incluida la pérdida consecuente incurrida por el uso del material.

Copyright © 2022 GEM Foundation

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

CONTENIDO

	Página
Contenido	4
Lista de Figuras	6
Lista de Tablas	9
Resumen Ejecutivo	10
Introducción	14
1. Amenaza Sísmica	20
1.1 Fuentes de amenaza sísmica	21
1.2 Modelos de movimiento del terreno e incertidumbre epistémica	22
1.3 Resultados de amenaza sísmica en roca.....	23
2. Caracterización de los efectos de sitio	27
2.1 Información geotécnica y geofísica.....	27
2.2 Metodología para el análisis de efectos de sitio.....	29
2.3 Funciones de amplificación del movimiento del suelo (AF).....	32
3. Modelo de Exposición	35
3.1 Demografía y división administrativa de la ciudad	35
3.2 Recopilación de datos	36
3.3 Clasificación de las edificaciones	36
3.4 Tipologías o clases constructivas predominantes	40
3.5 Modelo de exposición de la ciudad.....	42
4. Modelos de Vulnerabilidad	46
4.1 Base de datos de vulnerabilidad global GEM	46
4.2 Desarrollo de modelos locales de fragilidad	48
5. Riesgo Sísmico	50

5.1 Riesgo determinista: escenarios de riesgo para la ciudad.....	50
Lista de escenarios sísmicos.....	51
Metodología y suposiciones en el análisis de escenarios sísmicos	52
Perfiles de preparación y respuesta ante emergencias	54
Limitaciones de los perfiles de riesgo sísmico	56
5.2 Evaluación probabilista: eventos estocásticos para la ciudad.....	64
Metodología y suposiciones en el análisis de escenarios sísmicos	64
Perfil de mitigación y gestión del riesgo	65
6. Escenarios Volcánicos	68
Lista de escenarios volcánicos	68
Metodología y suposiciones de análisis.....	69
Perfiles de preparación y respuesta ante emergencias	70
Limitaciones de los perfiles de riesgo volcánico.....	70
7. Referencias	74

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ejemplo de un perfil de preparación y respuesta ante emergencias para el escenario de mayor impacto en el D.M.Q.....</i>	12
<i>Figura 2: Perfil de mitigación y gestión del riesgo a largo plazo para Quito.....</i>	13
<i>Figura 3. Administraciones zonales del distrito metropolitano, delineadas con las parroquias en escala de colores azules.....</i>	14
<i>Figura 4. Los tres componentes del riesgo catastrófico: la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad. Fuente GFDRR (2014).....</i>	15
<i>Figura 5. Vistazo del repositorio de acceso abierto en línea con los modelos y resultados del Proyecto TREQ.</i>	18
<i>Figura 6. Estudio de amenaza sísmica. [Izquierda] Fuentes tipo área corticales (con números) y fuentes de subducción de interface (con nombres). [Derecha] Fallas activas poco profundas utilizadas para crear las fuentes tipo falla. Fuente: Beauval et al. (2018).</i>	21
<i>Figura 7. Estudio de amenaza sísmica, fuentes de subducción intraplaca. Fuente: Beauval et al. (2018).</i>	22
<i>Figura 8. Árbol lógico de los modelos de movimiento del terreno. Fuente: Beauval et al. (2018).....</i>	23
<i>Figura 9. Mapa de aceleración pico-efectiva (PGA) promedio para el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años en roca ($V_{s30} = 760$ m/s). Fuente: Beauval et al. (2018).....</i>	24
<i>Figura 10. PGA promedio para el DMQ (en de roca) para el 10% (izquierda) y 2% (derecha) de probabilidad de excedencia en 50 años.....</i>	25
<i>Figura 11. Desagregación de la amenaza sísmica en PGA (en roca) para el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años para el DMQ. [Izquierda] Magnitud - Distancia - Épsilon. [Derecha] Latitud - Longitud - Región Tectónica.....</i>	26
<i>Figura 12. Mapas de amenaza en roca ($V_{s30}=800$m/s) para PGA con 10% PoE en 50 años, junto con microzonas, estaciones y exposición consideradas en este estudio.....</i>	28
<i>Figura 13. [Izquierda] Perfiles V_s digitalizados para Quito (13 perfiles, datos de ERN, 2012). [Derecha] Perfiles V_s extendidos al lecho rocoso de referencia ($V_s = 800$ m/s).</i>	29
<i>Figura 14. Esquema con metodología para la caracterización de los efectos de sitio. Fuente: Reporte TREQ D.2.2.4 (Gee et al., 2021)</i>	31

- Figura 15. Ejemplo de las funciones de amplificación simuladas para el mismo movimiento de entrada en dos sitios diferentes: a) suelo rígido con $V_{s30}=418\text{m/s}$ (izquierda), y b) suelo blando con $V_{s30}=273\text{ m/s}$ (derecha). Las funciones se estimaron para cuatro períodos (PGA, 0.3, 0.6 y 1.0 segundo) y los círculos negros representan la mediana de la amplificación usando el método "LOWESS" en la regresión..... 32*
- Figura 16. Modelo de respuesta del suelo para Quito. Funciones de amplificación (AF) indicando la mediana en cada zona homogénea para diferentes períodos..... 33*
- Figura 17. Modelo de exposición del Centro Histórico desarrollado por el Profesor Carlos Celi y sus colaboradores en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador..... 37*
- Figura 18. Variables categóricas de la capa constructiva (columna izquierda) utilizadas para identificar uno o más atributos estructurales, de ocupación y costo de reemplazo (filas superiores), por cada estructura registrada en el catastro del distrito metropolitano. 39*
- Figura 19. Configuraciones de pórticos de concreto confinando muros de mampostería. Tomado de: Informe Fase 1, Proyecto Sara (EPN, 2016)..... 40*
- Figura 20. Casa esquinera de adobe del siglo XVII, entre las calles Rocafuerte y Quiroga, en el centro histórico de Quito. Tomado de Centro Histórico de Quito: La vivienda (1991) y Google Maps (2020). 41*
- Figura 21. Torre CFN y Torres Santa Fe en el centro de Quito. Tomadas de: Google Maps (2020)..... 42*
- Figura 22. Distribución del número de edificaciones y el valor económico de la ciudad a nivel de barrio. 43*
- Figura 23. Distribución del número de edificaciones, los ocupantes y el valor expuesto de la ciudad por zona sísmica propuesta en el estudio de ERN (2012)..... 44*
- Figura 24. Distribución del número de edificaciones, los ocupantes y el valor expuesto de la ciudad por zona sísmica propuesta en el estudio de ERN (2012). Predominantemente el valor expuesto de la ciudad está en estructuras de 2 a 4 pisos de altura, con la zona MSQ11, MSQ4 y MSQ6 concentrando las edificaciones de gran altura. 45*
- Figura 25. (Arriba) Modelos de fragilidad utilizados para la estimación de daños en edificios para mampostería reforzada (MR) y pórticos de hormigón armado (CR) de baja ductilidad esperada (DUL) y altura de dos pisos (HEX:2). (Abajo) Modelos de vulnerabilidad estructural utilizados para la estimación de pérdidas económicas para las mismas clases de edificios. 47*
- Figura 26. (Derecha) Modelo numérico tridimensional para un edificio de pórtico de hormigón armado relleno de tres pisos de baja y moderada ductilidad que se encuentra comúnmente en Quito. (Derecha) Curvas de capacidad considerando la variabilidad de edificio a edificio en la configuración del sistema de resistencia de carga lateral. Este modelo está siendo desarrollado por Mauricio Guamán y José Poveda en la ESPE en el contexto de las actividades del TREQ con la academia en Quito..... 49*

- Figura 27. (Derecha) Modelo numérico tridimensional para edificios de pórticos de concreto reforzado con relleno de ductilidad baja y moderada de cuatro a seis pisos que se encuentran comúnmente en Quito. (Derecha) Curvas de capacidad considerando la variabilidad de edificio a edificio en la configuración del sistema de resistencia de carga lateral. Este modelo está siendo desarrollado por Patricio Palacios y Carlos Celi en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, en el contexto de las actividades del TREQ con la academia en Quito. 49*
- Figura 28. Ejemplo del panel superior del perfil, con las características principales de la ruptura del evento sísmico, el número de estructuras, los ocupantes y el valor económico expuesto de la ciudad. 54*
- Figura 29. Ejemplo del mapa con la distribución del daño debido al evento, resaltando las comunidades más vulnerables, considerando la fragilidad física de sus estructuras, las características del suelo local y las características de la ruptura modelada. 55*
- Figura 30. Ejemplo de la tabla de comunidades en alto riesgo ante el evento sísmico, mostrando el promedio del resto de métricas de riesgo obtenidos para cada una. 55*
- Figura 31. Ejemplo de un histograma de colapsos en la ciudad debido al evento, mostrando el rango de resultados obtenidos para todas las simulaciones. En este ejemplo, el 76% de las simulaciones resultaron en menos de 6,500 colapsos. Menos del 2% resulta en más de 12,900 colapsos. El promedio indica 4,100 colapsos como el resultado más probable. 56*

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Reportes (deliverables) generados en el marco del proyecto TREQ con respecto a la evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico a nivel urbano.</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2. Estadísticas principales de tamaño y costo de reemplazo de las edificaciones en la ciudad, por tipo de ocupación.</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 3. Lista de rupturas sísmicas y sus características utilizadas para estimar el riesgo determinista en el distrito metropolitano de Quito. Toda la información referente a la ruptura puede encontrarse en el reporte anexo "D2.4.1 Base de rupturas seleccionadas para el análisis de escenarios".</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 4. Escenarios de riesgo volcánico para Quito.</i>	<i>68</i>

RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento es el resultado del esfuerzo colaborativo entre la Fundación GEM, el Servicio Geológico de los Estados Unidos, la Dirección Metropolitana de Gestión del Riesgo, la Oficina de la Alcaldía de Quito, la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, y la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito. El objetivo de este reporte es presentar los resultados de la evaluación de riesgo urbano para el Distrito Metropolitano de Quito, obtenidos dentro del contexto del Proyecto para la Comunicación y Formación en la Evaluación de Riesgos por Terremotos (TREQ), financiado por la Oficina de Ayuda Humanitaria de los Estados Unidos (BHA, por sus siglas en inglés).

La evaluación del riesgo sísmico a nivel urbano requiere de diversos componentes. Este reporte aborda cada componente en una sección que describe en detalle el conjunto de datos y la metodología utilizada para desarrollarlos. En la sección del modelo de amenaza sísmica de la ciudad, se encuentra la descripción de las fuentes de sismicidad en la región y los modelos de movimiento del terreno que permiten evaluar la intensidad de la agitación sísmica. Para (la ciudad) se desarrollaron también modelos de amplificación de la intensidad que toman en cuenta la calidad de los estratos de suelo locales. En Quito se utilizó el modelo de amenaza sísmica para el Ecuador propuesto por Beauval et al. (2018), el cual emplea tres modelos de movimiento del terreno (MMT) por régimen tectónico y estima que la amenaza sísmica en el distrito metropolitano corresponde a una aceleración pico del terreno (PGA) promedio de 0.52 g en roca, con una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años. Para la ciudad también se desarrollaron funciones de amplificación sísmica para tomar en cuenta de forma explícita la calidad de los suelos de la ciudad en las estimaciones de riesgo. Encontramos que para el distrito metropolitano la intensidad sísmica se ve severamente amplificada en tres zonas de la ciudad donde vive más del 60% de la población.

En la sección del modelo de exposición se describe el inventario de las edificaciones urbanas expuestas a la amenaza sísmica. Este modelo es una representación de la ciudad, sus habitantes y su ambiente construido en el año 2020. Para Quito se ha desarrollado un modelo de exposición que incluye el número de estructuras, su ocupación, uso, ubicación, y caracterización estructural (e.g. material constructivo, altura y edad de constructiva), así como una evaluación del costo económico de reconstruir la edificación en caso de ser destruida en un evento sísmico. El modelo de exposición de Quito contiene más de 280,000 edificaciones. Incluye estructuras de uso residencial, comercial, industrial, educativas, institucionales y de salud, con un costo de reemplazo superior a los 55 billones de dólares Estadounidenses (USD) y más de 2 millones de habitantes. Durante la elaboración de la base datos se determinó que más del 70% de los habitantes vive en estructuras de 1 a 3 pisos con un nivel de provisiones sísmicas bajas, lo cual contribuye de forma significativa al riesgo sísmico de la ciudad.

La sección de modelos de vulnerabilidad describe la metodología empleada para estimar la vulnerabilidad física de las edificaciones. La vulnerabilidad asocia la intensidad de agitación del terreno

con un índice de pérdida. Por ende, permite estimar las pérdidas en cada estructura dada la ocurrencia de uno o varios eventos sísmicos. Para Quito se utilizaron 190 modelos de vulnerabilidad sísmica para realizar estimaciones de pérdidas. Estos incluyen las tipologías estructurales más importantes identificadas durante la caracterización de las edificaciones de la ciudad, que son la mampostería reforzada y no reforzada de 1 a 3 pisos, y el concreto reforzado utilizado en estructuras de 11 a 20 pisos. Con dichos modelos se han hecho estimaciones de diferentes niveles de daño (ligero, moderado, extenso, completo y colapso), afectación humana (desplazados, heridos de gravedad y fatalidades) y de pérdidas económicas.

En la evaluación del riesgo sísmico se presentan los resultados obtenidos para Quito. En este reporte el riesgo se presenta de forma determinística y probabilística. El riesgo determinístico es el riesgo estimado debido a la ocurrencia de un solo evento sísmico de características definidas. Dicho evento puede ser un sismo pasado o un sismo hipotético que es de gran relevancia para la ciudad debido a sus características (e.g. cercanía a la ciudad, régimen tectónico, y frecuencia de ocurrencia). Para el distrito metropolitano se realizó una selección de 7 escenarios sísmicos relevantes para la ciudad. Para cada uno se ha evaluado el impacto que tendría en la ciudad en sus condiciones actuales. Los resultados de riesgo determinístico tienen la intención de informar las políticas de preparación y respuesta para eventos de impacto mediano hasta muy alto, dependiendo de la magnitud y la ubicación del evento analizado. De los eventos analizados concluimos que un evento como el terremoto de subducción en la Placa de Nazca en 1906, con una magnitud de 8.8 y una profundidad de 20 kilómetros, sería de mediano impacto para la ciudad, causando en promedio más de 1,000 colapsos, 1,200 fatalidades y \$4 billones de dólares en pérdidas, equivalentes al 7% del valor económico de la construcción de la ciudad. El escenario de mayor impacto es un sismo hipotético superficial, ocurriendo en el centro de la ciudad, con una magnitud de Mw 7.0 y una profundidad de 8 kilómetros. En este caso estimamos que el resultado promedio sería más de 6,000 estructuras colapsadas, 7,000 fatalidades y \$17 billones de dólares en pérdidas, equivalentes a un 30% del valor económico de la construcción de la ciudad. El riesgo estimado por escenarios provee métricas del impacto total en la ciudad en términos de estructuras colapsadas, desplazados, heridos y fatalidades. Por consiguiente, tiene la intención de apoyar acciones de preparación ante desastres probables. Los resultados para cada escenario se presentan en una serie de perfiles de riesgo de preparación y respuesta ante emergencias, como se muestra en la Figura 1. Estos perfiles han sido trabajados en conjunto con el grupo técnico de la ciudad y profesionales en áreas de respuesta ante desastres y ayuda humanitaria.

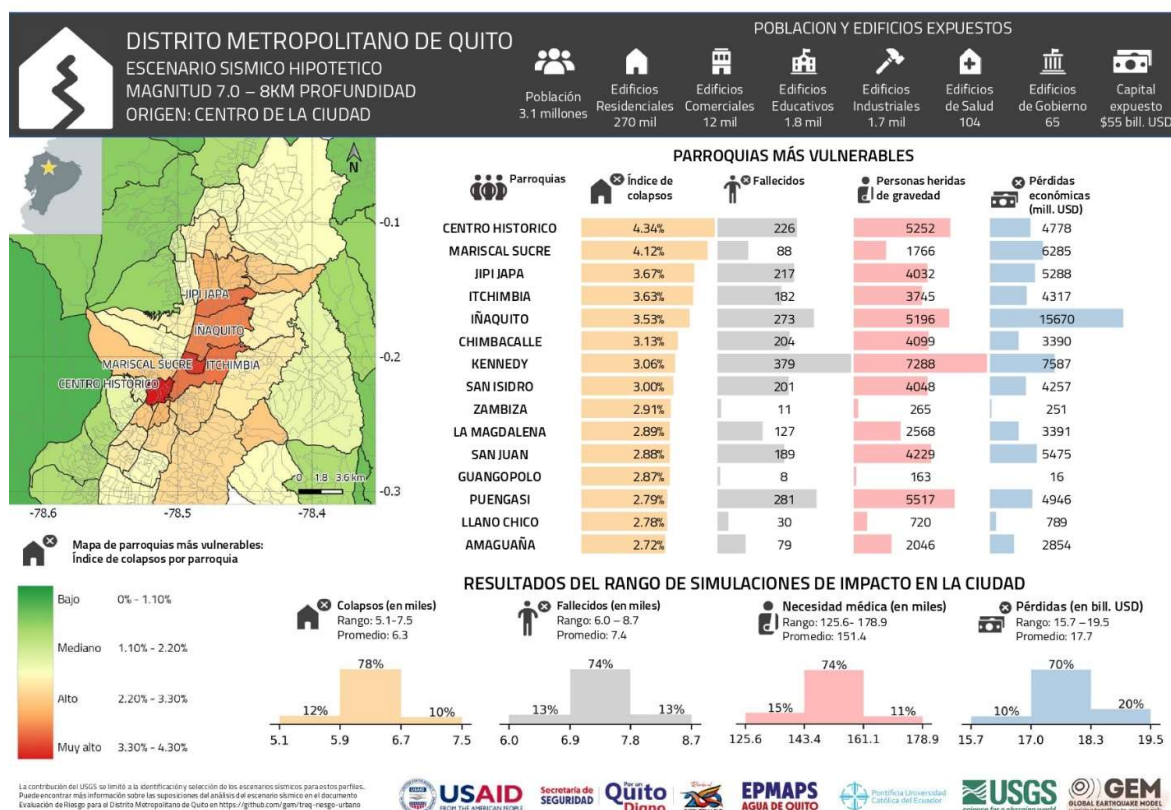


Figura 1. Ejemplo de un perfil de preparación y respuesta ante emergencias para el escenario de mayor impacto en el D.M.Q.

El riesgo probabilístico es el riesgo estimado tomando en cuenta todos los eventos sísmicos que pueden ocurrir dentro de un periodo de tiempo determinado. Debido a esto, es el riesgo que la sismicidad de la región representa para la ciudad a futuro y puede informar políticas de gestión del riesgo y mitigación de vulnerabilidad física y social a largo plazo. Para el distrito metropolitano evaluamos el riesgo probabilístico para un periodo de 27,000 años de sismicidad. Para cada uno de los eventos sísmicos dañinos simulados dentro de este periodo estimamos el daño y las pérdidas humanas y económicas para la ciudad. En el análisis determinamos cuáles comunidades sufren mayores pérdidas a lo largo del tiempo de sismicidad, identificamos los factores que contribuyen más al daño y las pérdidas, y determinamos la frecuencia con la que pueden ocurrir eventos sísmicos con el mayor potencial destructivo. Los resultados indican que dentro del tiempo de sismicidad, Quito puede tener pérdidas de 26 fatalidades y 133 millones de dólares en un promedio anual, las cuales pueden aumentar hasta 74 fatalidades y 311 millones de dólares al tomar en cuenta la amplificación de la intensidad sísmica debido a la calidad de los suelos de la ciudad. En el análisis las 5 parroquias más afectadas debido a su vulnerabilidad física, exposición a los eventos sísmicos y la condición de los suelos son La Concepción, El Centro Histórico, La Cochapamba, Cotocollao y Belisario Quevedo. Los resultados probabilísticos del riesgo se presentan en este reporte en la forma de un perfil de mitigación y gestión del riesgo, como se muestra en la Figura 2. Este perfil también ha sido elaborado en conjunto

con el grupo técnico de la ciudad y profesionales en áreas de respuesta ante desastres y ayuda humanitaria.

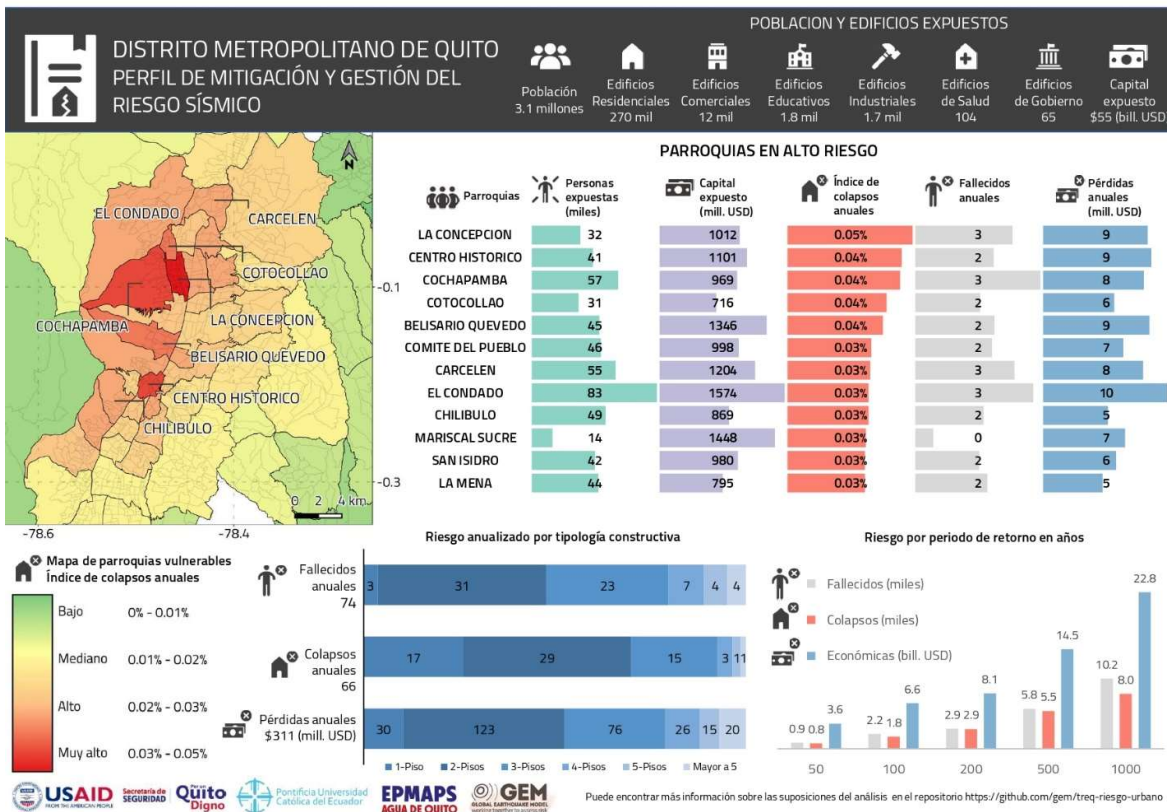


Figura 2: Perfil de mitigación y gestión del riesgo a largo plazo para Quito.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de San Francisco de Quito, que actualmente comprende los municipios del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), es la capital de Ecuador y el centro político-administrativo del país. Actualmente alberga a más del 15% de la población nacional y al 87% de la población de la provincia de Pichincha, lo que la convierte en el centro urbano más importante del país. El DMQ es la zona de más rápido crecimiento. Según el Instituto de Estadística y Censos del Ecuador (INEC) el DMQ pasó de tener una población total de 1.82 millones de habitantes en 2001 a más de 2.23 millones en 2010 (INEC, 2010). En la actualidad hay alrededor de 3 millones de habitantes, de los cuales 72% viven en el área urbana y 24% en el área rural. El DMQ se divide en administraciones zonales que contienen 66 parroquias y más de 1,200 barrios, como se muestra en la Figura 3.

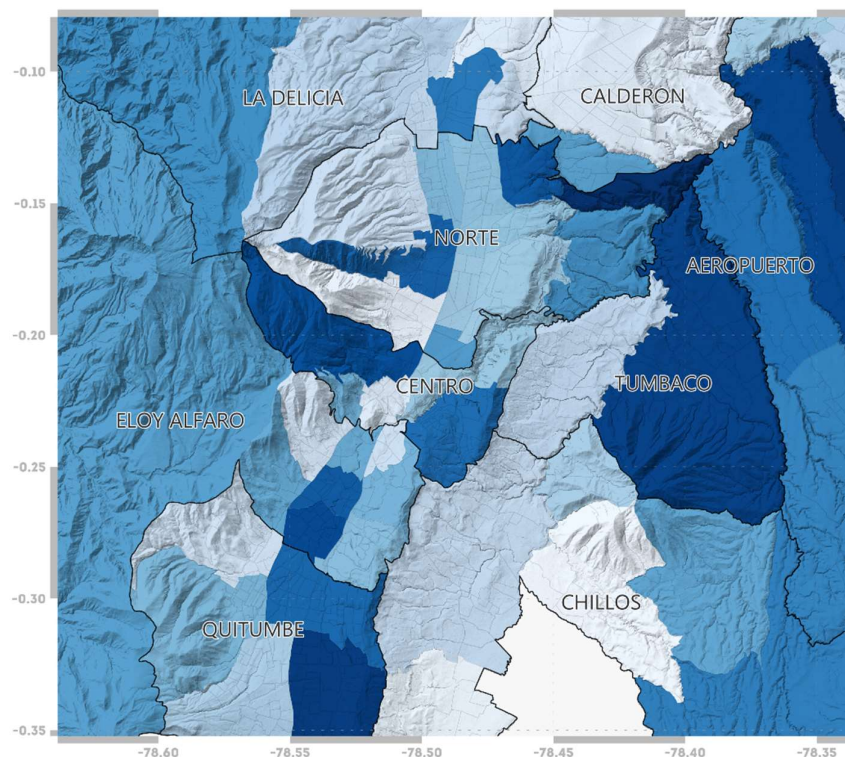


Figura 3. Administraciones zonales del distrito metropolitano, delineadas con las parroquias en escala de colores azules.

De acuerdo con la Norma Ecuatoria de la construcción (NEC, 2013), la ciudad se encuentra localizada en una zona de amenaza sísmica alta. Particularmente, el DMQ está ubicado en un estrecho valle de los Andes delimitado por fallas activas. La mayoría de los eventos sísmicos históricamente dañinos provienen del valle interandino (es decir, terremotos superficiales de la corteza superficial), aunque también se han sentido en Quito terremotos relacionados con la subducción, como el reciente terremoto de Pedernales Mw 7.8 de 2016. La ciudad está ubicada en la cuenca de Quito, la cual está

compuesta en su mayoría por material de origen volcánico del Pleistoceno medio de los complejos volcánicos cercanos Pichincha y Atacazo, y también por depósitos fluviales y aluviales (Villagómez, 2003).

Dada la historia de los terremotos que ha experimentado la ciudad y que comprometieron la estabilidad de su infraestructura y la seguridad de sus habitantes, hoy en día se cuenta con un plan de ordenamiento territorial (POT) en el que existe el mandato de mejorar el entendimiento de las amenazas naturales y sus asociados riesgos, así como de reducir y mitigar los efectos de los mismos (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito - MDMQ, 2015).

Para realizar una evaluación de riesgo sísmico a nivel urbano es necesario contar con tres componentes: la amenaza sísmica y su posible amplificación debido a la calidad de los suelos locales, la exposición y la vulnerabilidad, como se esquematiza en la Figura 4. La amenaza se refiere a la probabilidad de que ocurra un fenómeno natural potencialmente destructivo en un lugar dado (en este caso, un terremoto); en el caso del análisis a nivel urbano es importante incorporar las características del suelo de la ciudad (resultados de microzonificaciones sísmicas), con el fin de proporcionar estimativos más certeros según las condiciones locales. Un modelo de exposición debe describir, de la forma más detallada posible, los elementos que se encuentran amenazados por el fenómeno natural; dichos elementos, pueden ser edificios residenciales, escuelas hospitales, puentes y demás, y deben ser examinados para cuantificar correctamente su vulnerabilidad física y potencial estado de riesgo (GFDRR 2014).

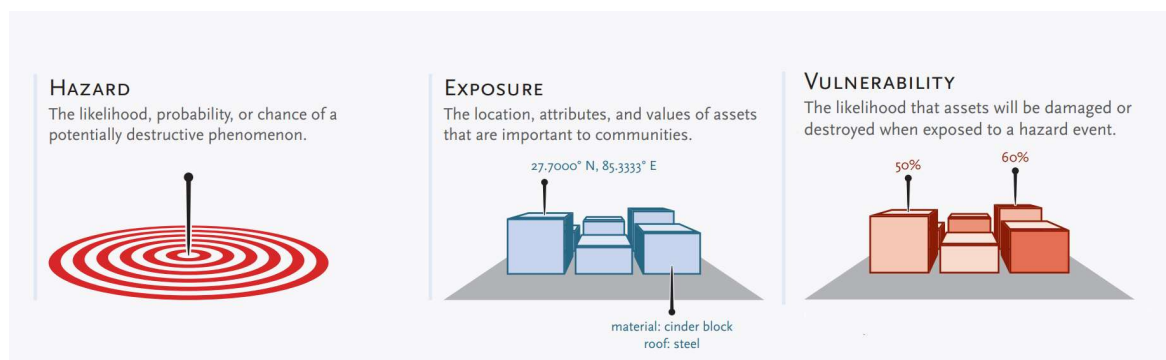


Figura 4. Los tres componentes del riesgo catastrófico: la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad. Fuente GFDRR (2014).

El presente reporte sintetiza los modelos y resultados de la evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico para el Distrito Metropolitano de Quito. Primero se describe el modelo de amenaza sísmica utilizado (fuentes de sismicidad, árboles lógicos) y se presentan los resultados, tales como mapas y curvas de amenaza sísmica, enfocándose en la situación actual de la ciudad. Seguidamente se presentan las suposiciones y resultados de las consideraciones de los efectos de sitio, es decir, la incorporación de los resultados disponibles de la microzonificación sísmica y la exploración de los suelos. En esta sección se presentan las funciones de amplificación del movimiento del suelo obtenidas

para las diferentes zonas homogéneas. Posteriormente se resume la metodología y resultados del modelo de exposición desarrollado conjuntamente con la comunidad científica de la ciudad, resaltando las tipologías constructivas más comunes en la ciudad y mapas que permiten visualizar la distribución espacial de las edificaciones según sus características constructivas. Para la componente de la vulnerabilidad, se resume la metodología y se referencian las funciones de fragilidad y vulnerabilidad utilizadas en los análisis. Finalmente, se presentan los resultados de la evaluación del riesgo sísmico en la ciudad. Los resultados incluyen la evaluación del riesgo determinista y probabilista. Para el riesgo determinista presentamos los resultados en forma de perfiles de preparación y respuesta. Para el riesgo probabilista presentamos los resultados en forma de un perfil de mitigación y gestión del riesgo.

Este trabajo es el resultado de las actividades desarrolladas en el marco del proyecto TREQ (Training and Communication for Earthquake Risk Assessment, por sus siglas en inglés, o Capacitación y Comunicación para la Evaluación del Riesgo por Terremotos), el cual está financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Oficina de Asistencia Humanitaria (BHA). El proyecto TREQ está diseñado para demostrar cómo la evaluación de amenazas y riesgos de terremotos puede informar a los tomadores de decisiones sobre el desarrollo de políticas de reducción de riesgos, así como el riesgo de terremotos puede comunicarse adecuadamente a las partes interesadas y al público en general. Los resultados de este trabajo pueden utilizarse para informar estrategias de reducción del riesgo de desastres, así como el entendimiento y conocimiento del riesgo sísmico a nivel público.

El proyecto TREQ se enfocó en dos objetivos principales: 1) la evaluación detallada de la amenaza y el riesgo sísmico a nivel urbano y 2) el entrenamiento y comunicación de dichas ciencias a las comunidades y gobiernos involucrados. Por su importancia estratégica, nivel patrimonial y estado de amenaza, tres ciudades de Suramérica y el Caribe fueron seleccionadas para la implementación de esta iniciativa: Quito (Ecuador), Cali (Colombia) y Santiago de los Caballeros (República Dominicana). La

Tabla 7 presenta los reportes (“Deliverables”) generados en el marco del proyecto TREQ, con respecto a la evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico a nivel urbano. La documentación complementaria a este reporte está disponible en la página web del proyecto TREQ (<https://www.globalquakemodel.org/proj/treq>) y a lo largo del reporte se referencian documentos que profundizan en los diferentes temas presentados. Por último, para facilitar la transferencia del conocimiento adquirido por las partes involucradas hemos creado un repositorio en línea de acceso abierto en este enlace: <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>. Este repositorio contiene los diferentes componentes del modelo de riesgo desarrollados junto al grupo técnico de la ciudad y los resultados que presentamos en este reporte. La Figura 5 contiene un vistazo del repositorio. También hemos hecho disponibles los videos en los cuales se muestra cómo acceder y navegar la información producida por el proyecto en la plataforma de YouTube: <https://youtu.be/FckyM5mZP10> y <https://youtu.be/Bvj3VPFhQuc>

DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, ECUADOR

Evaluación del riesgo sísmico a nivel urbano

En este repositorio

En este repositorio se puede encontrar los modelos desarrollados y resultados obtenidos para la evaluación del riesgo sísmico en la ciudad.

- **Amenaza:** Incluye información relativa al modelo de amenaza sísmica de referencia utilizado en los cálculos probabilísticos y para la selección de los escenarios sísmicos
- **Condiciones_Sitio:** Archivos con los modelos de las condiciones de sitio en formato compatible con OpenQuake
- **Exposicion:** Archivos con el modelo de exposición para la ciudad y los esquemas de clasificación que relacionan las tipologías constructivas y su vulnerabilidad (taxonomy_mapping) en formato compatible con OpenQuake.
- **GIS:** Capas georeferenciadas con los mapas de la ciudad con diferentes niveles administrativos
- **Mapas:** Mapas e imágenes con los modelos o resultados para la ciudad
- **OpenQuake:** Archivos de configuración para realizar los escenarios de riesgo o los cálculos probabilísticos
- **Riesgo:** Resultados del análisis de riesgo usando OpenQuake y perfiles para la ciudad
- **Rupturas_Sismicas:** Rupturas de los escenarios de riesgo sísmico seleccionados en formato compatible con OpenQuake

Vistazo de los resultados de riesgo sísmico

El reporte [Evaluación del riesgo sísmico para el DMQ](#) presenta los detalles de los modelos utilizados y resultados obtenidos.

Perfiles de mitigación del riesgo sísmico (mediano y largo plazo)

DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO
PERFIL DE MITIGACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

- Población: 3.1 millones
- Edificios Residenciales: 270 mil
- Edificios Comerciales: 12 mil
- Edificios Educativos: 1.8 mil
- Edificios Industriales: 1.7 mil
- Edificios de Salud: 104
- Edificios de Gobierno: 65
- Capital expuesto: \$35.8 mil USD

PARROQUIAS EN ALTO RIESGO

Parroquia	Población (hab.)	Capital expuesto (mil. USD)	Riesgo	Parroquias en alto riesgo	Parroquias en alto riesgo (mil. USD)
LA CONFECCION	37	1815	0.00%	3	5
CENTRO HISTORICO	31	1101	0.00%	2	5
CONDORAMBA	17	908	0.00%	1	5
COTACOLLAO	31	716	0.00%	2	5
BELISARIO QUEVEDO	45	1340	0.00%	2	5
COMTE DEL PUEBLO	48	598	0.00%	2	7
CRUCESUR	35	1305	0.00%	1	6
LA COMPAÑIA	83	1574	0.00%	1	10
EL BAMBUCO	38	889	0.00%	2	5
MARISCAL SUCRE	14	1448	0.00%	0	5
SAN SIDRO	42	588	0.00%	2	5
LA NIEVA	44	795	0.00%	2	5

Riesgo analizado por tipología constructiva

Tipología	Parroquias	Capital expuesto (mil. USD)
Edificios Residenciales	31	73
Edificios Comerciales	17	23
Edificios Educativos	10	121
Edificios Industriales	7	15
Edificios de Salud	4	23
Edificios de Gobierno	6	15

Riesgo por periodo de retorno en años

Periodo de Retorno (años)	Capital expuesto (mil. USD)
10	3.8
20	3.7
50	1.8
100	297.2
200	8.8
500	14.3
1000	102
2000	8.0

Perfiles de respuesta (escenarios sísmicos)

DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO
ESCENARIO SISMICO HIPOTETICO
MAGNITUD 6.5 - 8KM PROFUNDIDAD
ORIGEN: CONOCOTÓ

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

- Población: 3.1 millones
- Edificios Residenciales: 270 mil
- Edificios Comerciales: 12 mil
- Edificios Educativos: 1.8 mil
- Edificios Industriales: 1.7 mil
- Edificios de Salud: 104
- Edificios de Gobierno: 65
- Capital expuesto: \$35.8 mil USD

PARROQUIAS MÁS VULNERABLES

Parroquia	Población (hab.)	Capital expuesto (mil. USD)	Vulnerabilidad	Parroquias más vulnerables (mil. USD)
SCLARITA	105	280	32%	105
CHILLAGALLO	105	155	32%	105

Figura 5. Vistazo del repositorio de acceso abierto en línea con los modelos y resultados del Proyecto TREQ.

Tabla 1. Reportes (deliverables) generados en el marco del proyecto TREQ con respecto a la evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico a nivel urbano.

Evaluación de la amenaza sísmica

- D2.2.1 Description of the compiled datasets and the selected seismic hazard models.
[Descripción de las bases de datos recopiladas y los modelos de amenaza sísmica seleccionados].
- D2.2.2 National earthquake hazard model for the Dominican Republic.
[Modelo nacional de amenaza sísmica para la República Dominicana].
- D2.2.3 Seismic hazard results (rock and soil conditions).
[Resultados de amenaza sísmica (condiciones en roca y en suelo)].
- D2.2.4 Seismic hazard analysis at the urban scale.
[Análisis de la amenaza sísmica a escala urbana].

Evaluación del riesgo sísmico

- D2.3.1 Technical report with description of building classes identified in each city.
[Reporte sobre tipologías constructivas en las ciudades del Proyecto TREQ]
- D2.3.2 Geo-referenced exposure database of population and residential, industrial and commercial buildings, and where available, other occupancy classes. One database per city.
[Base de datos de exposición georreferenciada de población y edificios residenciales, industriales y comerciales, y donde esté disponible, otras clases de ocupación. Una base de datos por ciudad].
- D2.3.3 Database of fragility and vulnerability functions for each building class present in the exposure model.
[Base de datos de funciones de fragilidad y vulnerabilidad para cada clase de edificio presente en el modelo de exposición].
- D2.3.4 Maps and risk metrics generated for each city
[Mapas y métricas de riesgo para cada ciudad].
- D2.3.5 An executive summary report with findings and highlights of the exposure, vulnerability and risk models.
[Resumen ejecutivo con hallazgos y aspectos destacados de los modelos de exposición, vulnerabilidad y riesgo].

Escenarios de riesgo sísmico

- D2.4.1 Database with ruptures selected for scenario analysis.
[Base de datos con rupturas seleccionadas para análisis de escenarios].
- D2.4.2 Scenario hazard assessment for the representative earthquakes in each city. A report illustrating the methodologies, the selected scenarios and the results will be provided.
[Evaluación de la peligrosidad del escenario para los sismos representativos de cada ciudad. Se proporcionará un informe ilustrativo de las metodologías, los escenarios seleccionados y los resultados].

Aplicaciones específicas de los modelos de riesgo urbano

- D2.5.2 Report for earthquake induced landslides and liquefaction in Cali.
[Reporte de deslizamientos y licuefacción inducidos por sismo en Cali].

1. AMENAZA SÍSMICA

Para evaluar la amenaza y el riesgo sísmico a escala urbana es necesario generar estimaciones de amenaza sísmica que incorporen las características de la geología local y de los efectos no lineales de los suelos, los cuales generalmente no se consideran en los estudios nacionales o regionales de amenaza sísmica.

El primer paso para seleccionar un modelo de amenaza sísmica de referencia para los análisis (tanto en roca como en suelo) fue la revisión crítica de los modelos disponibles para la ciudad. A pesar de que los principios básicos para construir este tipo de modelos siguen siendo casi los mismos en los últimos 50 años (Cornell, 1968; McGuire, 2004), existe una amplia variedad de metodologías y aplicaciones para desarrollar sus componentes principales y estimar la amenaza. El reporte *"D2.2.1 Descripción de las bases de datos recopiladas y los modelos de amenaza sísmica seleccionados"* presenta en detalle la revisión de los modelos existentes, sus potencialidades y limitaciones.

El modelo propuesto por Beauval et al. (2018) para Ecuador fue seleccionado como modelo de referencia para el DMQ. Este modelo se beneficia de una colaboración científica de largo plazo, apoyándose en la información más actualizada disponible en el país. Este estudio revisó la sismicidad histórica e instrumental, así como la tectónica activa (Beauval et al., 2013; Alvarado et al., 2014). Esto favoreció la definición de un nuevo modelo nacional de fuentes sísmicas (Yepes et al., 2016) y estimaciones de amenaza.

Este modelo se utilizó para estimar las aceleraciones en el lecho rocoso (estimativos en roca), así como considerando una condición del suelo simplificada, la cual considera los efectos de sitio a partir de la velocidad promedio de las ondas de corte en los primeros 30 metros de profundidad (V_{s30}). La velocidad V_{s30} hace parte del término que se encarga de los efectos de sitio en los modelos más recientes para estimar el movimiento del terreno, más conocidos como ecuaciones de atenuación o de predicción del movimiento del suelo (GMPE por sus siglas en inglés). El reporte *"D2.2.3 Resultados de amenaza sísmica (condiciones en roca y en suelo)"* presenta en detalle las características del modelo usado y sus resultados en la ciudad.

Esta sección presenta de forma resumida las características principales del modelo de amenaza y sus resultados para condiciones de roca utilizando el software OpenQuake Engine (Pagani et al. 2014). Se utilizó una malla de puntos uniformemente distribuidos (1 km de distancia) que cubre toda la ciudad y se estimaron aceleraciones para un 10% y un 2% de probabilidad de excedencia (PoE) en 50 años. Se consideraron varios períodos estructurales (es decir, aceleración máxima del suelo y aceleración espectral a 0.2, 0.5, 1.0 y 2.0 segundos). Los espectros uniformes de amenaza se derivaron utilizando estos períodos espectrales para las probabilidades de excedencia consideradas. Además, se realizó un

análisis de desagregación para identificar las fuentes que más contribuyen a la amenaza en roca de la ciudad.

1.1 Fuentes de amenaza sísmica

El modelo de fuentes sísmicas de Beauval et al. (2018) está compuesto por fuentes tipo área (Figura 6 izquierda) que encierran los principales sistemas de fallas activas (Figura 6 derecha) a lo largo del límite entre el bloque Andino Norte, y la placa Suramericana. Se incluyeron dos grandes fuentes tipo área de fondo para tener en cuenta la sismicidad difusa no asociada con las fallas corticales consideradas. El catálogo fue el principal recurso utilizado para caracterizar las fuentes y se utilizaron tres distribuciones diferentes de magnitud-frecuencia basadas en tres catálogos diversos. El modelo de falla se desarrolló utilizando estimaciones de tasa de deslizamiento tanto geológico como geodésico, y se utilizaron tres modelos alternativos (es decir, tasa de deslizamiento geodésico sin deformación sísmica, tasa de deslizamiento geodésico con un 50% de deformación sísmica y tasa de deslizamiento geológico). Las fuentes de la interface de subducción también se modelaron como fuentes tipo área (Figura 6 izquierda).

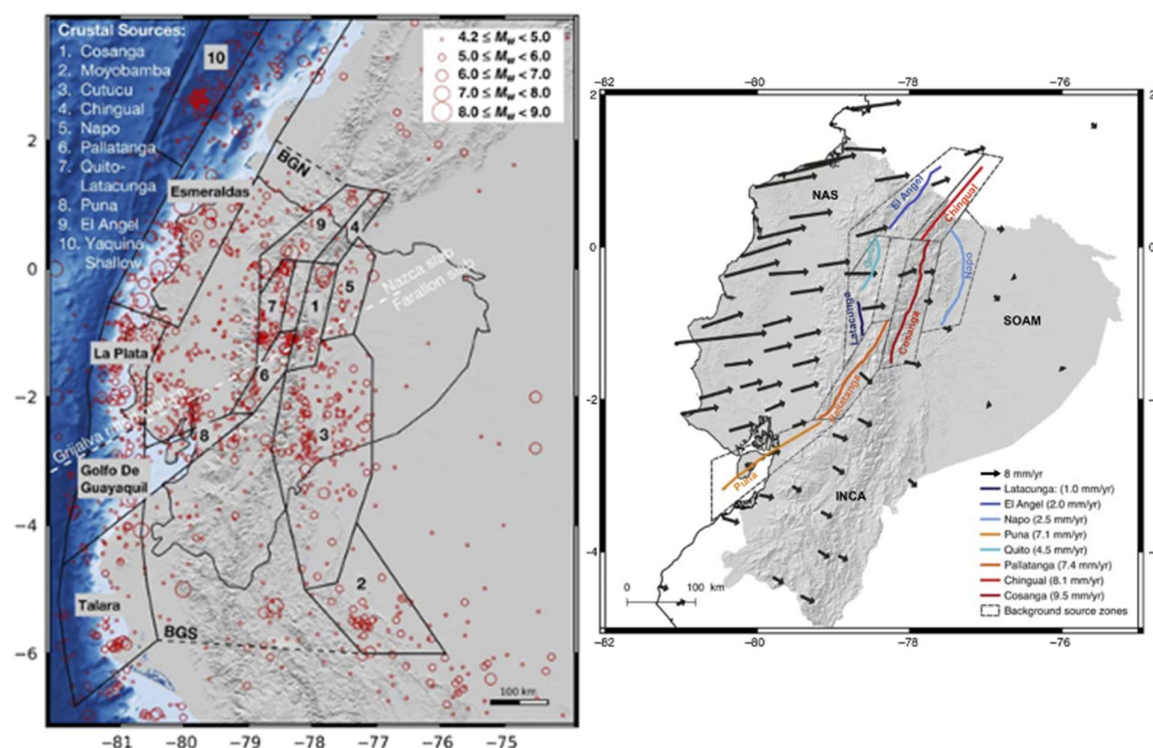


Figura 6. Estudio de amenaza sísmica. [Izquierda] Fuentes tipo área corticales (con números) y fuentes de subducción de interface (con nombres). [Derecha] Fallas activas poco profundas utilizadas para crear las fuentes tipo falla. Fuente: Beauval et al. (2018).

La sismicidad intraplaca se modeló en volúmenes (Figura 7) definidos a profundidades crecientes (eventos a más de 35 km) para modelar las variaciones de la placa a lo largo de la dirección del

buzamiento. La grieta de Grijalva separa dos dominios de placas en subducción diferentes. El dominio Farallón más activo contiene cuatro volúmenes de inmersión, mientras que el dominio Nazca contiene dos volúmenes de inmersión. Para la caracterización de las fuentes tipo área y de los volúmenes se utilizaron tres catálogos sísmicos alternativos. Además del catálogo homogéneo de Ecuador, se consideraron un catálogo basado en ISC y un catálogo basado en la NEIC.

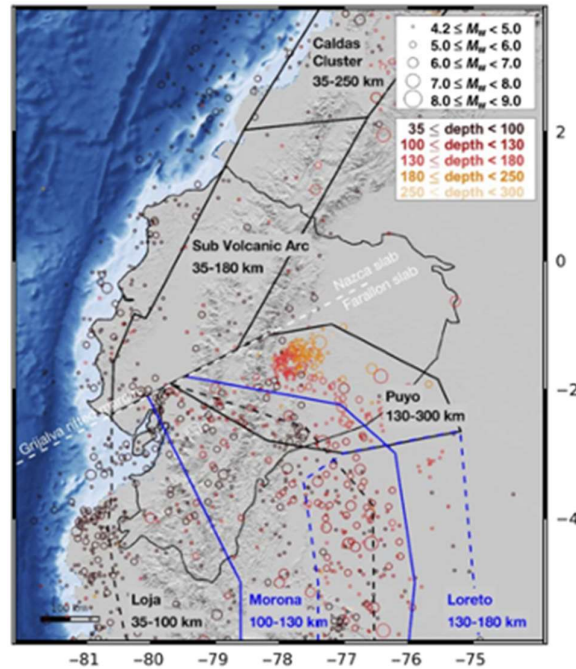


Figura 7. Estudio de amenaza sísmica, fuentes de subducción intraplaca. Fuente: Beauval et al. (2018).

1.2 Modelos de movimiento del terreno e incertidumbre epistémica

La caracterización del movimiento del suelo del modelo nacional se beneficia de los registros de movimiento fuerte recopilados por los autores. Estos datos se utilizaron para realizar una selección de las ecuaciones de atenuación, GMPEs, más apropiadas para cada ambiente tectónico (es decir, fuentes corticales, intraplaca e interface), de acuerdo los modelos disponibles en la literatura. La Figura 8 (en la derecha) presenta lo modelos de movimiento del terreno definidos para cada ambiente tectónico y sus correspondientes pesos en el árbol lógico.

El modelo de Beauval et al. (2018) considera incertidumbres epistémicas relacionadas tanto con la caracterización de las fuentes sísmicas como con la caracterización del movimiento del terreno. El árbol lógico del modelo de amenaza contiene en total 324 combinaciones o ramas, como se indica en la Figura 8. Se pueden observar las ramas correspondientes a los dos modelos de fuentes (modelo de fuentes tipo área y modelo de fuentes tipo falla). Se utilizan tres modelos de tasas de recurrencia para cada tipo de fuente, y tres modelos de movimiento del terreno para cada región tectónica.

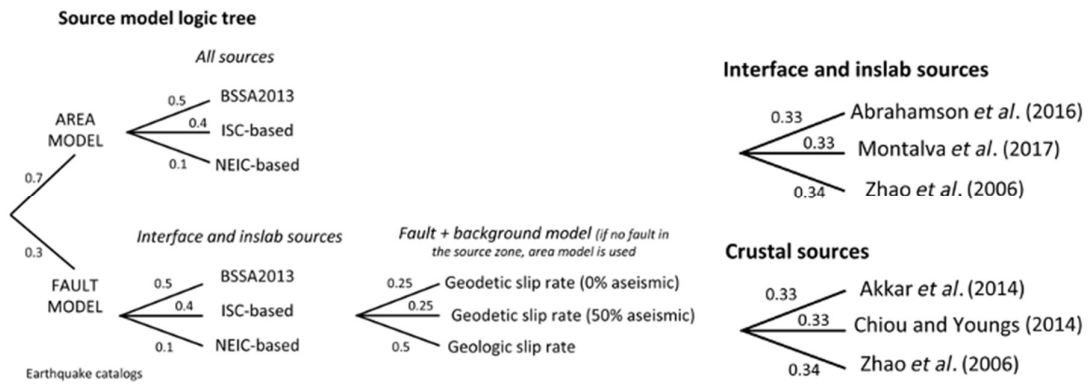


Figura 8. Árbol lógico de los modelos de movimiento del terreno. Fuente: Beauval et al. (2018)

1.3 Resultados de amenaza sísmica en roca

La Figura 9 presenta el mapa de amenaza sísmica para la aceleración pico efectiva (PGA) promedio para un periodo de retorno de 475 años (10% de probabilidad de excedencia en 50 años) en roca ($V_{s30} = 760\text{m/s}$). Los valores más altos de PGA se encuentran a lo largo de la costa en la región noroeste (mayores de $0.5g$). Los valores más altos (superiores a $0.4g$) están presentes en la Cordillera. Los valores más bajos se ubican en la región nororiental. Para el DMQ se esperan aceleraciones del orden de $0.5g$.

En el presente estudio se utilizó una versión simplificada del modelo porque fue la información compartida por los autores (el modelo completo es privado). Esta versión contiene fuentes de subducción y superficiales caracterizadas usando el catálogo basado en ISC y fallas corticales desarrolladas considerando tasas de deslizamiento geodésico y asumiendo un 50% de deslizamiento sísmico.

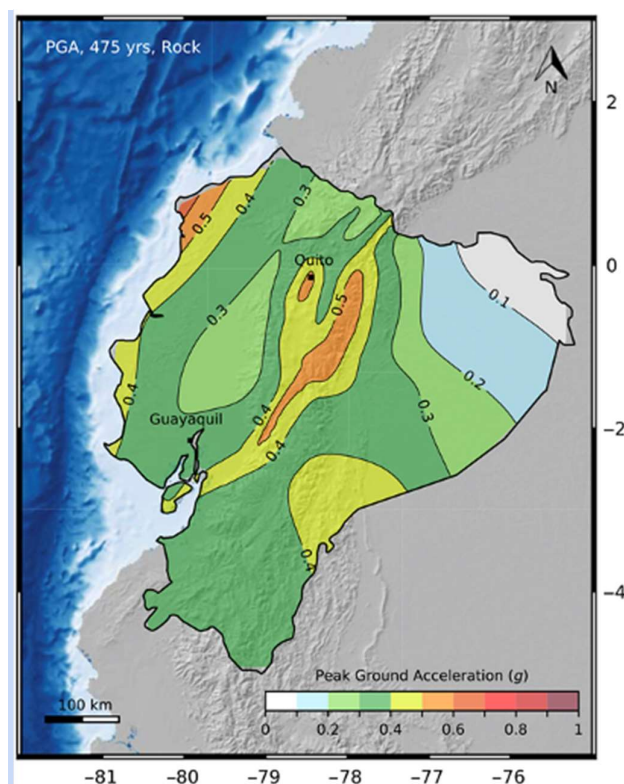


Figura 9. Mapa de aceleración pico-efectiva (PGA) promedio para el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años en roca ($V_{s30} = 760$ m/s). Fuente: Beauval et al. (2018)

Para el caso específico del DMQ, la Figura 10 presenta los mapas de amenaza sísmica para la aceleración pico efectiva (PGA) media. Los valores más altos de PGA alcanzan 0.56g y 1.11g para el 10% y 2% de probabilidad de excedencia en 50 años, los cuales están ubicados en la parte central de la ciudad, mayormente influenciada por la contribución de la falla de Quito. Se pronostican valores de amenaza medios para la parte occidental de la ciudad, que también se ve afectada por las fuentes de subducción, con valores que en su mayoría oscilan entre 0.50 y 0.45 g para el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años y entre 1.0 y 1.1 g para el 2 % de probabilidad de excedencia en 50 años. Los valores más bajos se esperan en la región oriental (entre 0.4 y 0.7 g para el 10% y 2% de probabilidad de excedencia en 50 años, respectivamente).

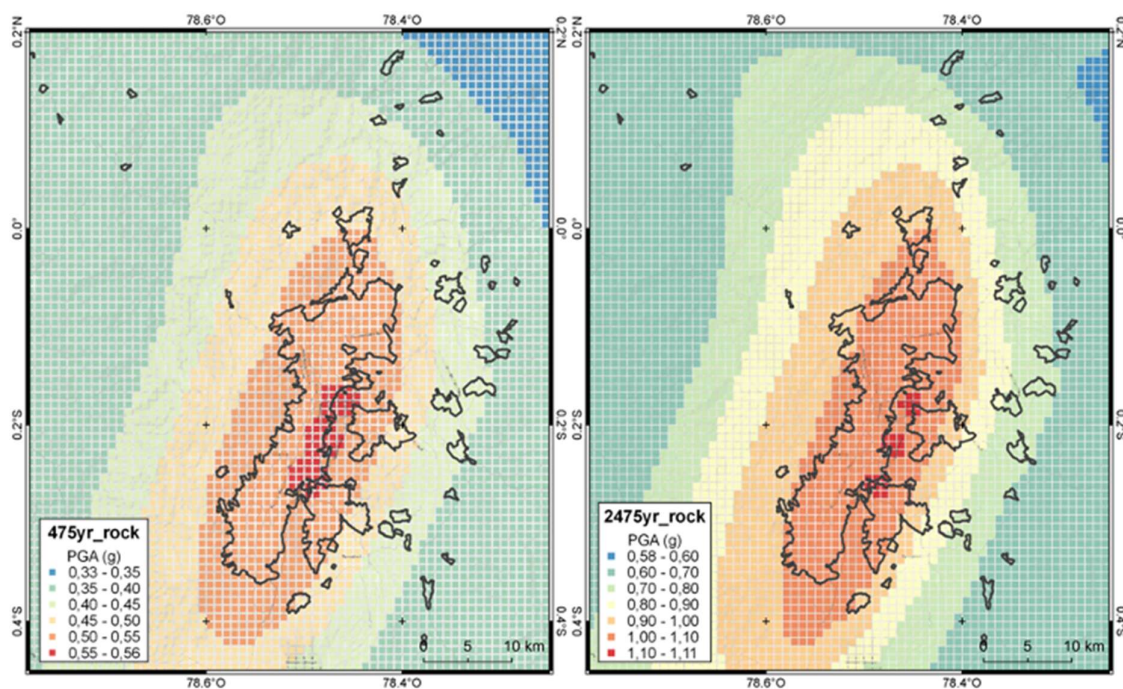


Figura 10. PGA promedio para el DMQ (en de roca) para el 10% (izquierda) y 2% (derecha) de probabilidad de excedencia en 50 años.

Se realizó un análisis de desagregación para un sitio en la ciudad (78.514°O y 0.221°S) como una combinación de: i) magnitud, distancia y épsilon; ii) longitud, latitud y región tectónica; y iii) longitud, latitud y magnitud. El análisis se centró en la aceleración pico-efectiva (PGA) para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años y suelo tipo roca. Se consideraron fuentes sísmicas en un radio de 200 km del perímetro de la ciudad. La Figura 11 muestra los resultados de una combinación de Magnitud - Distancia - Épsilon (número de desviaciones estándar de la media de una GMPE) agrupada en rangos de 0.5 Mw y 10 km. La mayor contribución a la amenaza proviene de fuentes corticales activas cerca o dentro de la ciudad (aproximadamente a 5 km) con magnitudes entre 6.5 y 7.5, en particular por el sistema de fallas (inverso) de Quito. Pequeñas contribuciones provienen de las fuentes de subducción (a 120 km de distancia) y de otras fuentes de fallas superficiales a 50 km de distancia.

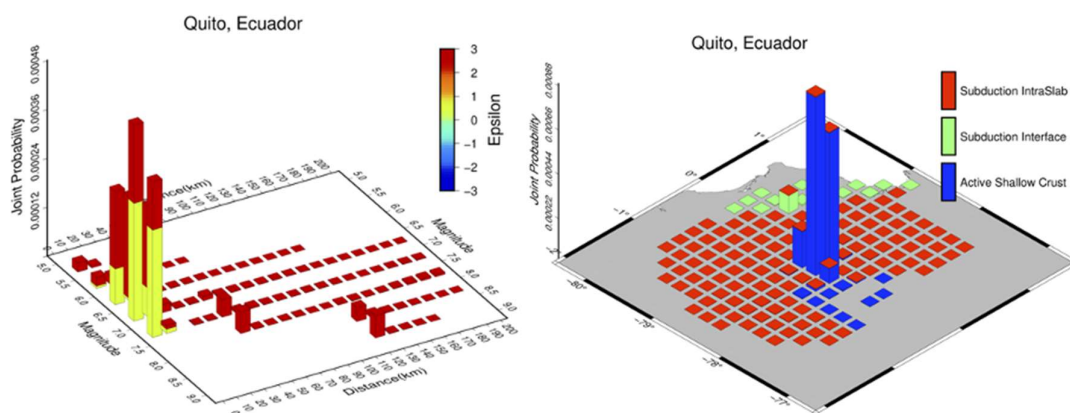


Figura 11. Desagregación de la amenaza sísmica en PGA (en roca) para el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años para el DMQ. [Izquierda] Magnitud - Distancia - Épsilon. [Derecha] Latitud - Longitud - Región Tectónica.

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO

Existen dos enfoques principales para modelar la respuesta del sitio en el análisis de amenaza sísmica. El primero, y más común, es modelar la respuesta del sitio a través de funciones de amplificación ergódicas genéricas dentro de las ecuaciones de atenuación del movimiento del terreno, GMPEs, (por ejemplo, Kamai et al., 2014), que comúnmente usan el parámetro V_{s30} como un proxy para la respuesta del sitio. Esto generalmente se usa para análisis a escala nacional o regional, ya que V_{s30} se puede estimar fácilmente a partir de la topografía de la superficie (Allen y Wald, 2007; Heath et al., 2020). Si bien este enfoque es práctico, no siempre es posible capturar todos los aspectos de la respuesta del sitio, como los efectos de resonancia y la no linealidad del suelo. El segundo enfoque requiere datos geotécnicos o geofísicos locales e implica modelar explícitamente la respuesta del suelo y luego ajustar el modelo de amenaza o los resultados de la amenaza en el lecho rocoso de referencia, para lo cual se han propuesto varios métodos, como lo presenta la revisión disponible en Aristizábal et al., 2016. El segundo enfoque se usa comúnmente en estudios específicos del sitio, donde se requiere un mayor nivel de detalle al modelar la respuesta del suelo. Los estudios de microzonificación también siguen el segundo enfoque para el modelado de la respuesta del suelo. Sin embargo, estos estudios generalmente no calculan los resultados de la amenaza probabilística, sino que se centran en identificar zonas con comportamiento sísmico homogéneo y proporcionar acciones de diseño sísmico.

Para realizar el estudio de amenaza y riesgo sísmico para el Distrito Metropolitano de Quito a escala urbana se utilizó el enfoque detallado (segundo enfoque) y se desarrollaron modelos de respuesta del suelo con base en los resultados disponibles en la microzonificación sísmica de la ciudad. Uno de los objetivos del proyecto TREQ en la ciudad fue desarrollar funciones de amplificación del movimiento del terreno que permitan determinar con mayor precisión la amenaza sísmica (y por lo tanto, el riesgo sísmico) en comparación con los enfoques estándar que se basan en el parámetro de V_{s30} .

Las siguientes secciones resumen los resultados de las funciones de amplificación para la ciudad con respecto a la amenaza sísmica. El reporte *"D2.2.4 Análisis de la amenaza sísmica a escala urbana"* presenta en detalle la metodología, resultados y análisis de la estimación de los efectos de sitio en las tres ciudades del proyecto TREQ.

2.1 Información geotécnica y geofísica

El primer paso es la recopilación de la información geotécnica para definir los parámetros necesarios para el análisis de respuesta del sitio, los cuales incluyen el espesor de la capa, la velocidad de la onda de corte (V_s), el peso unitario (γ), el índice de plasticidad (PI), la clasificación del suelo siguiendo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) y la profundidad del nivel freático. Posteriormente, los datos se homogenizan para tener en cuenta los valores faltantes y las diferencias en las unidades

medidas. Finalmente, los perfiles se extendieron hasta la condición del lecho rocoso de referencia para el cual se calcula la amenaza, que se define como la profundidad cuando se alcanza $V_s=800$ m/s.

Para la ciudad de Quito, numerosos estudios relacionados con la microzonificación sísmica se han realizado en la ciudad desde la década de 1990 (por ejemplo, EPN et al., 1994; Guéguen, 1997; ERN, 2012; León, 2018). Para el proyecto TREQ se utilizaron los datos geotécnicos y la zonificación propuesta por ERN (2012), ya que el estudio de microzonificación sísmica que actualmente se está desarrollando para el DMQ no contaba con resultados públicamente disponibles a la fecha de solicitud. Se recolectaron datos geotécnicos en 13 estaciones y la ciudad se dividió en las 13 microzonas propuestas, las cuales abarcan el 92% de las edificaciones existentes en el DMQ (ver Figura 12). La mayoría de los ocupantes expuestos, los edificios y el valor económico se encuentran en las zonas MSQ2, MSQ10 y MSQ11.

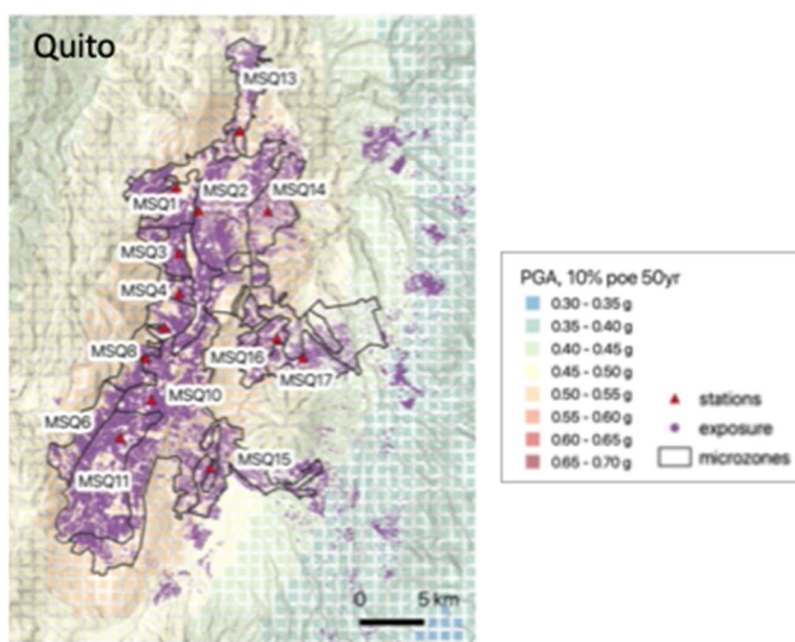


Figura 12. Mapas de amenaza en roca ($V_s=800$ m/s) para PGA con 10% PoE en 50 años, junto con microzonas, estaciones y exposición consideradas en este estudio.

Para todos los sitios, los perfiles de referencia no alcanzan el lecho rocoso ($V_s=800$ m/s) y, por lo tanto, deben extenderse. Se utilizó la metodología propuesta por EPRI (2013) y las plantillas de perfiles recomendadas para extrapolar los perfiles. La Figura 13 presenta los perfiles originales y extendidos para la ciudad, y se observa que los perfiles más profundos se extienden hasta una profundidad de 950 m.

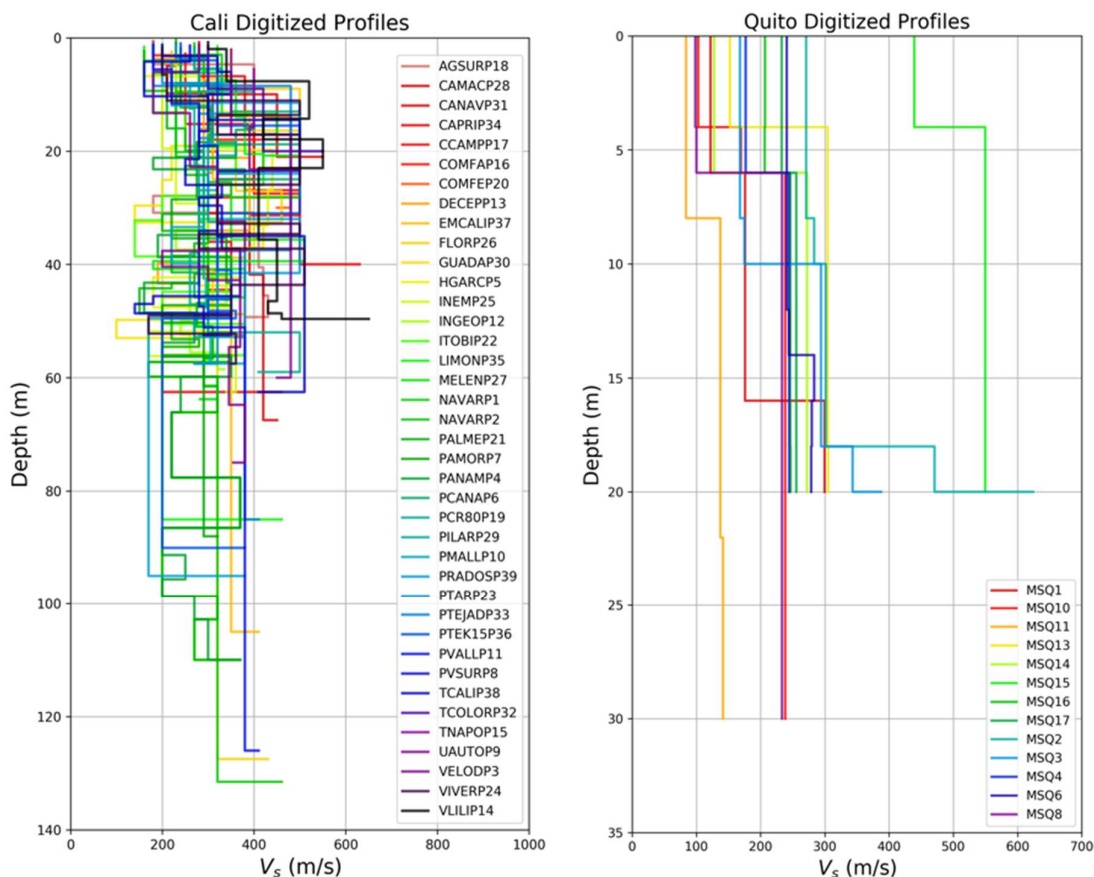


Figura 13. [Izquierda] Perfiles Vs digitalizados para Quito (13 perfiles, datos de ERN, 2012). [Derecha] Perfiles Vs extendidos al lecho rocoso de referencia ($V_s = 800$ m/s).

2.2 Metodología para el análisis de efectos de sitio

La metodología para la modelación de los efectos de sitio en la ciudad puede resumirse en cinco etapas como se presenta a continuación. Adicionalmente, la Figura 14 esquematiza el proceso para el desarrollo del modelo de respuesta de suelo y la cuantificación de sus efectos.

1. Desarrollo del modelo de respuesta del suelo utilizando los datos geotécnicos y geofísicos locales disponibles (presentados previamente).

El modelo de amenaza sísmica se utiliza para simular posibles movimientos de entrada en el lecho rocoso necesarios para el análisis de la respuesta de sitio en la ciudad (SRA, Soil Response Analysis, por sus siglas en inglés). Estas simulaciones se realizan utilizando la teoría de vibraciones aleatorias (Rathje y Ozbey, 2006; Kottke y Rathje, 2013) que se usa comúnmente para análisis de amenaza en sitios específicos (por ejemplo, Rodríguez-Marek et al., 2014, 2017; Ameri et al., 2017; Tromans et al., 2019). El principal beneficio de este enfoque (además de eliminar la necesidad de seleccionar y escalar series de tiempo) es que se pueden considerar

muchos escenarios que permiten cubrir una amplia gama de intensidades de sacudidas del suelo, que son importantes para estimar con precisión la amenaza y el riesgo para múltiples períodos de retorno.

2. Simulación de la respuesta del suelo utilizando análisis lineal equivalente 1D por medio del software pySRA (<https://github.com/arkottke/pysra>) y el conjunto de movimientos de entrada generados a partir del modelo de amenaza sísmica, los cuales tienen en cuenta la incertidumbre asociada al fenómeno. Con este software la respuesta del suelo se trata como lineal, pero las propiedades dinámicas del suelo (es decir, módulo de corte y amortiguamiento) se actualizan en función del nivel de deformación en cada capa para capturar el no-comportamiento lineal del suelo.

El conjunto de movimientos de entrada se propaga a través de cada columna de suelo para obtener los movimientos de superficie. El comportamiento no lineal de los suelos se modela utilizando las curvas de reducción del módulo y de amortiguamiento del material, y se consideran propiedades específicas, tales como el índice de plasticidad, el índice de sobreconsolidación y la profundidad del nivel freático en cada sitio caracterizado.

3. Definición de las funciones de amplificación del suelo (AF) y su incertidumbre asociada (σ_{inAF}), las cuales representan los modelos de respuesta del suelo en diferentes zonas homogéneas. Las funciones de amplificación se calculan dividiendo los movimientos de superficie calculados por los respectivos movimientos de entrada, para cada período de interés y en cada sitio de análisis. Las funciones de amplificación se definen para períodos relevantes para el análisis de amenaza (entre PGA y 2.0 segundos), así como para una amplia gama de niveles de intensidad de sacudidas del lecho rocoso (entre 0.05 y 4.0 g) y, por lo tanto, pueden usarse fácilmente para el análisis probabilístico de amenaza y riesgo sísmico.

Dado que el objetivo es aplicar el modelo de respuesta del suelo en cualquier ubicación dentro de la ciudad, las funciones de amplificación y su incertidumbre se calcularon por zonas, y no solo en sitios individuales. La suposición subyacente es que la respuesta del suelo es similar dentro de cada zona homogénea, usando como referencia la zonificación propuesta en el estudio de microzonificación sísmica. Como ejemplo, la Figura 15 muestra las funciones de amplificación simuladas para el mismo movimiento de entrada en dos sitios diferentes: uno rígido y otro blando. Factores de amplificación mayores a 1 indican amplificación, mientras que valores menores a 1 indican deamplificación.

4. Cálculo de curvas de amenaza sísmica en superficie y verificación de los resultados. Las curvas de amenaza en la superficie se calculan utilizando el enfoque de convolución numérica (Bazzurro y Cornell, 2004, ec. 3) implementado en el software de OpenQuake, en el cual se combina la curva de amenaza calculada en el lecho rocoso de referencia con la función de densidad de probabilidad de la función de amplificación (es decir, la mediana de AF y σ_{inAF}). En el enfoque de convolución, cada intensidad de movimiento del suelo de la curva de amenaza

del lecho rocoso contribuye a la amenaza en cada intensidad de movimiento del suelo en la superficie, según su respectiva probabilidad de excedencia. Una ventaja de este método es que permite incorporar la incertidumbre de la AF (es decir, σ_{InAF}), a pesar de considerarla en su totalidad como un fenómeno aleatorio.

Las curvas de amenaza sísmica obtenidas por medio de diferentes metodologías se comparan y analizan con el fin de revisar y verificar el impacto de la incorporación de los efectos de sitio en la estimación del movimiento del suelo.

- Para los cálculos de riesgo sísmico el modelo de amplificación del suelo se incorpora utilizando un enfoque diferente. Primero se genera un catálogo estocástico de terremotos. Para cada evento, se calcula un campo de movimiento del suelo en el lecho rocoso de referencia, donde los componentes de la variabilidad del movimiento del terreno entre eventos y dentro de un mismo evento se simulan por separado, si de esta forma lo especifican las GMPE. Para cada sitio, el movimiento del suelo en el lecho rocoso de referencia se multiplica por un valor aleatorio de la función de densidad de probabilidad AF (es decir, la mediana AF y σ_{InAF}) para obtener el movimiento del suelo en la superficie.

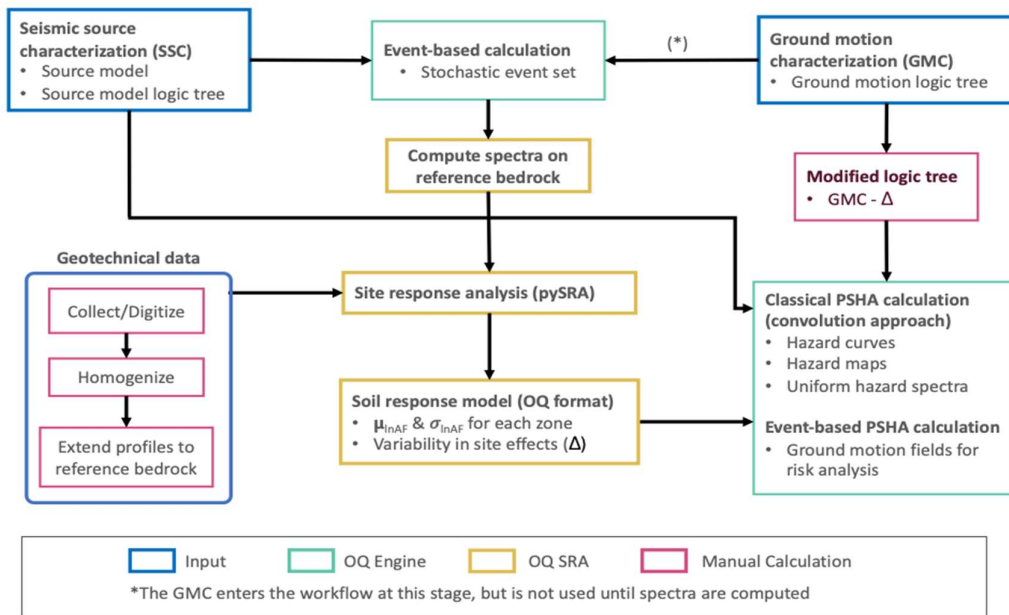


Figura 14. Esquema con metodología para la caracterización de los efectos de sitio.
Fuente: Reporte TREQ D.2.2.4 (Gee et al., 2021)

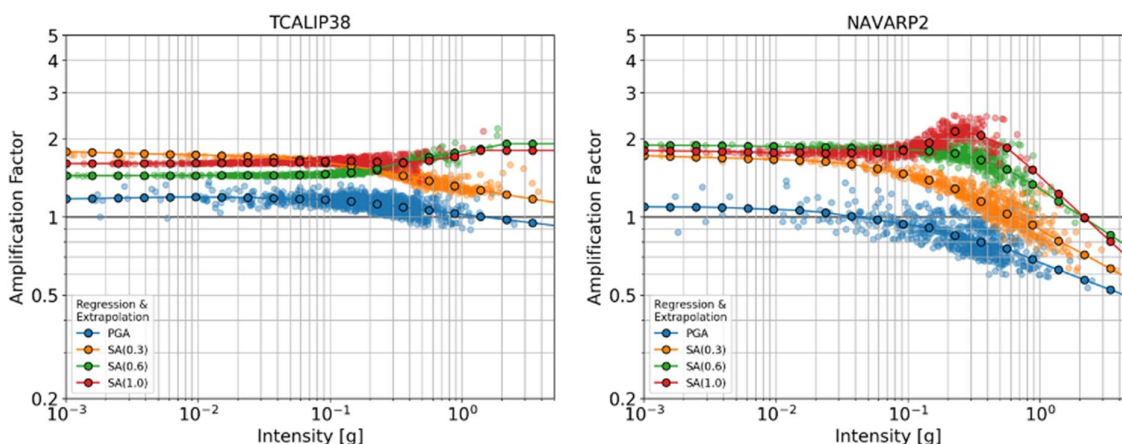


Figura 15. Ejemplo de las funciones de amplificación simuladas para el mismo movimiento de entrada en dos sitios diferentes: a) suelo rígido con $Vs30=418\text{m/s}$ (izquierda), y b) suelo blando con $Vs30=273\text{ m/s}$ (derecha). Las funciones se estimaron para cuatro períodos (PGA, 0.3, 0.6 y 1.0 segundo) y los círculos negros representan la mediana de la amplificación usando el método "LOWESS" en la regresión.

2.3 Funciones de amplificación del movimiento del suelo (AF)

El resultado de la caracterización de los efectos de sitio en la ciudad es un modelo de respuesta del suelo en formato compatible con el software OpenQuake. Este es esencialmente un archivo separado por comas (*.csv) que contiene las funciones de amplificación del suelo (AF) y su incertidumbre asociada ($\sigma_{\ln AF}$) para diferentes períodos espectrales y diferentes niveles de intensidad. Cada función de amplificación se define como la relación espectral entre el movimiento en superficie y el movimiento del lecho roca ($Sa_{\text{superficie}} / Sa_{\text{roca}}$), y $\sigma_{\ln AF}$ es la desviación estándar del logaritmo de las FA.

En el repositorio <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano> están disponibles los archivos de texto con las funciones en formato compatible con OpenQuake. La zona "noaf" se usa para zonas por fuera del área definida en la microzonificación sísmica, para las cuales se asumió $AF=1$ (sin amplificación) y en su lugar se utiliza el valor de $Vs30$ de referencia para la ciudad.

De acuerdo con los mapas y curvas generadas en la ciudad para comprender la influencia (y la variabilidad) de las condiciones del sitio en los resultados de amenazas, es evidente que los movimientos de períodos largos (SA a 1,0 s) están más influenciados por las variaciones en las condiciones del sitio que los de períodos cortos (PGA y/o SA a 0,2 s).

El modelo de respuesta del suelo para Quito se muestra en la Figura 16. Todas las zonas, con excepción de MSQ11, se amplifican en todos los períodos e intensidades, alcanzando hasta un factor 5 en la Zona MSQ3 a 2.0 segundos. No se observan tendencias generales para los períodos que más se amplifican, ya que son diferentes en todos los sitios. Centrándonos en las zonas MSQ2, MSQ10 y MSQ11, que son las zonas de mayor impacto en el riesgo (como se discute en las secciones siguientes), se observa que

tienen respuestas notablemente diferentes. La zona MSQ2 tiene una amplificación destacada a los 0.3 segundos, que se mantiene por encima de 2.5 hasta 0.5 g. Esto es consistente con el contraste de impedancia a 20 m de profundidad (Figura 13) que, dado el perfil Vs del sitio, corresponde a un período resonante fundamental en línea con la amplificación observada a 0.3 segundos. Adicionalmente, no se observa ablandamiento del suelo en esta zona, lo que implica factores de amplificación más altos a intensidades altas en comparación con otras zonas. La zona MSQ11, por otro lado, exhibe un ablandamiento del suelo con el aumento de la intensidad de la sacudida del lecho rocoso y es la única zona donde se observa una desamplificación notable en todas las frecuencias (aunque a intensidades muy grandes > 1 g). Esto es consistente con que este perfil sea el más suave de Quito (Figura 13). La zona MSQ10 exhibe una amplificación más moderada, alcanzando un factor de 2.5 y luego disminuyendo (en todas las frecuencias) hasta un factor ~1 a medida que aumenta la intensidad de la agitación.

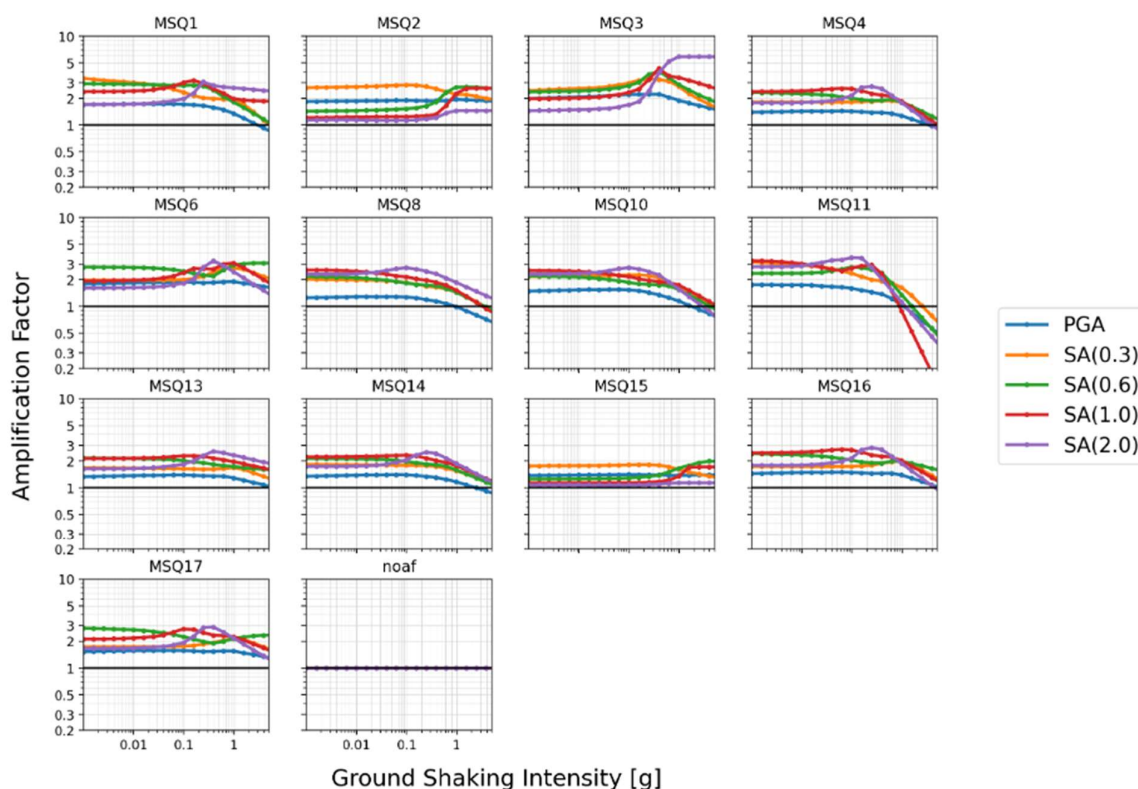


Figura 16. Modelo de respuesta del suelo para Quito. Funciones de amplificación (AF) indicando la mediana en cada zona homogénea para diferentes períodos.

Para Quito, el estudio de ERN et al. (2012) realizó análisis de la respuesta de sitio lineal equivalente 1D usando SHAKE91 y 22 series de tiempo. El estudio calculó espectros de respuesta en la superficie (no funciones de amplificación). Al igual que ERN et al. (2012), se encontró que la respuesta es bastante variable dentro de la cuenca de Quito, tanto espacialmente como en términos de periodos amplificados.

El presente estudio indica que las amplificaciones más altas (> 3) están en las zonas MSQ1, MSQ3, MSQ6 y MSQ11, mientras que en ERN et al. (2012) encuentran que los picos espectrales más grandes están en las zonas MSQ8, MSQ10 y MSQ11. En la zona norte de MSQ2, que tiene un gran impacto en el riesgo, se encontró una amplificación a los 0.3 segundos, pero un pico tan destacado no se observa en ERN et al. (2012) para este período. En la parte sur de la cuenca, se observó que las estaciones MSQ8, MSQ10 y MSQ1 alcanzan la amplificación máxima a los 2.0 segundos, lo que está en línea con otros estudios que han indicado periodos de resonancia más prolongados en el sur (por ejemplo, Alfonso-Naya et al., 2012; Laurendeau et al., 2017).

3. MODELO DE EXPOSICIÓN

Un modelo de exposición es fundamental para la evaluación del impacto debido a las amenazas naturales, ya que contiene información sobre la ubicación geográfica, las características físicas y el valor económico de las edificaciones expuestas a las amenazas. El entorno creado por el hombre, su contenido y sus ocupantes son todos elementos expuestos a amenazas naturales y deben ser examinados para cuantificar correctamente su vulnerabilidad física y riesgo potencial (GFDRR 2014). La Fundación GEM desarrolló conjuntos de datos de exposición para Ecuador, Colombia y República Dominicana como parte de las actividades del Modelo de Riesgo Global en 2018 (Silva et al. 2020). Dichas bases de datos se utilizaron para estudiar el riesgo sísmico a nivel nacional. Como parte de las actividades del proyecto TREQ hemos mejorado la información de exposición disponible para cada ciudad con el fin de proporcionar modelos detallados adecuados para la evaluación del riesgo sísmico a escala urbana. Entre las principales mejoras a los conjuntos de datos, destacamos la resolución espacial detallada de las edificaciones, una robusta caracterización física de las estructuras, la inclusión de estructuras de uso educativo, institucional y de salud, y actualizaciones en el costo de la construcción en la ciudad. El resultado es un modelo de exposición de alta resolución por ciudad, el cuál está disponible en el entregable '*D2.3.2 Bases de datos de exposición georreferenciada de edificios y población en las ciudades TREQ*'. En esta sección hacemos una reseña de las bases de datos y el marco metodológico con el cual se ha desarrollado el modelo de exposición, así como sus resultados más relevantes.

3.1 Demografía y división administrativa de la ciudad

La ciudad de Quito, que actualmente abarca los municipios del Distrito Metropolitano de Quito o DMQ, es la capital del Ecuador y el centro político administrativo del país. Actualmente alberga a más del 15% de la población nacional y 87% de la población de Pichincha, haciéndola el centro urbano más importante de la provincia. De acuerdo con el Instituto de Estadísticas y Censos del Ecuador (INEC) el DMQ pasó de tener una población total de 1.82 millones de habitantes en el 2001 a más de 2.23 millones en el 2010 (INEC, 2010). Hoy en día la ciudadanía está distribuida con 72% en zonas urbanas y 24% en las rurales. Está dividido en administraciones zonales que contienen 66 parroquias y más de 1200 barrios. Entre los años 1760 y 1971 la mayor expansión urbana se dio en las administraciones zonales conocidas hoy como la ciudad consolidada (Gómez y Cuvi, 2016). Sin embargo, desde los setentas en adelante las parroquias con el mayor crecimiento poblacional se encuentran en la periferia urbana y las áreas suburbanas. Por ejemplo, en el 2010 la administración zonal Manuela Saenz, donde se encuentra la parroquia del Centro Histórico, reportó una disminución anual poblacional del 0.5%. Por otro lado, las administraciones de mayor crecimiento se dieron en el área suburbana, como es el caso de Calderón y Tumbaco con incrementos poblacionales del 4.7% y 3.0% anuales respectivamente (POT Quito, 2011).

3.2 Recopilación de datos

Las entidades de ordenamiento territorial han recopilado información sobre la construcción en la ciudad en bases de datos oficiales y públicas. Se revisó una gran cantidad de información existente, que va desde documentos de planificación urbana, límites administrativos, censos de la ciudad, encuestas in situ y bases de datos catastrales. La información se recopiló a través de consultas en línea en las bases de datos de la ciudad o directamente de la Secretaría de Gestión del Riesgo. De esta forma obtuvimos conjuntos de datos actualizados de alta resolución sobre el uso del suelo, las características de las estructuras, su ocupantes e indicadores socioeconómicos que permiten hacer una adecuada caracterización de la vulnerabilidad física y social de los bienes y habitantes de la ciudad. Para Quito, se utilizaron un total de 29 conjuntos de datos para definir el modelo de exposición. Estos incluyen el censo oficial de población y hogares (proyectado a 2020), la base de datos catastral de la ciudad (2020), el conjunto de datos de uso de suelo (2016) y el desarrollo histórico del límite urbano de la ciudad de 1760 hasta 2015. El profesor Carlos Celi de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, contribuyó con el estudio y levantamiento de más de 2,000 edificaciones en el centro histórico de la ciudad. Como aporte fundamental para el estudio de la exposición en la ciudad, esta información hace parte del modelo de exposición a nivel de edificación de la ciudad, además de ser utilizado para evaluar la calidad de las bases de datos con la información constructiva de la ciudad.

3.3 Clasificación de las edificaciones

El desarrollo de los conjuntos de datos de exposición requiere el procesamiento de los datos recopilados y la obtención de atributos que puedan usarse para clasificar los activos por su vulnerabilidad, tipo de ocupación y costo de reemplazo. Como las bases de datos provienen de diferentes fuentes, las mismas varían en formato, calidad y complejidad. En este estudio trabajamos principalmente con fuentes de información: alfanumérica y geográfica. Por ejemplo, las bases de datos censales, que contienen la información demográfica y social de los habitantes de la ciudad pertenecen al primer grupo. Las bases de datos con el uso del suelo, y las características constructivas de las edificaciones pertenecen al segundo grupo. Como ambos tipos son bases de datos georeferenciadas (e.g. contienen información sobre su ubicación en el espacio ya sea por nombre administrativo o por coordenada geográfica), toda la información recolectada fue enlazada por medio de una unión espacial o por medio de un campo común. A la base de datos que contiene toda la información enlazada la llamamos capa de información constructiva de la ciudad.

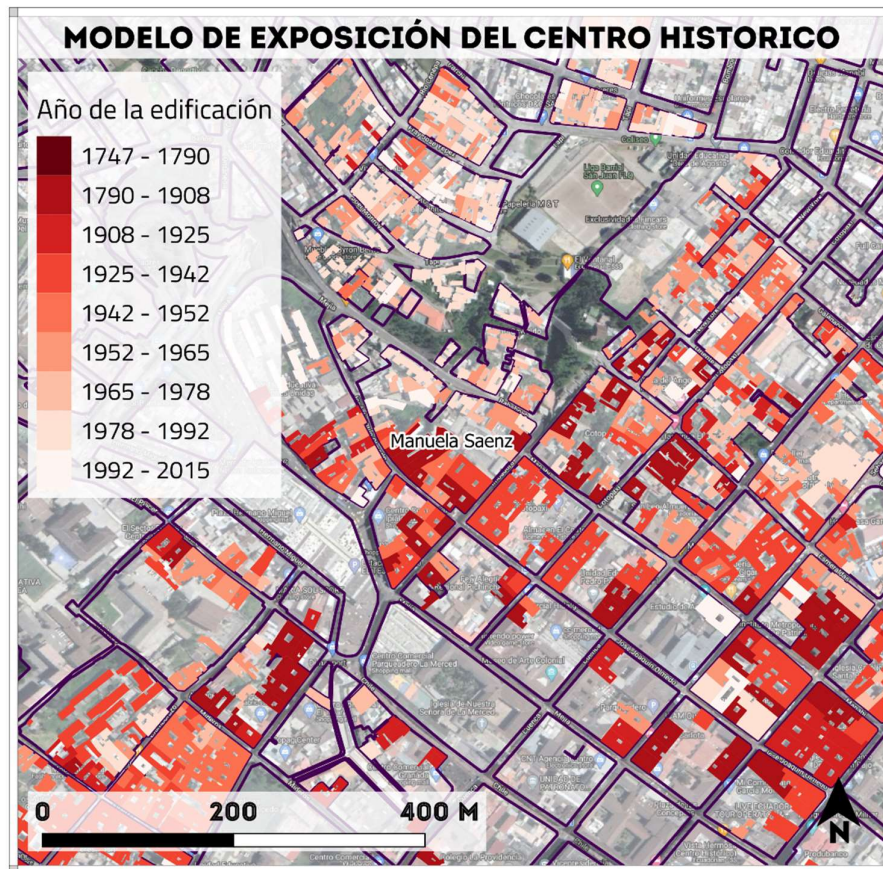


Figura 17. Modelo de exposición del Centro Histórico desarrollado por el Profesor Carlos Celi y sus colaboradores en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Una vez obtenida la capa de información constructiva, la misma es procesada para clasificar cada una de las estructuras según su fragilidad y vulnerabilidad sísmica. Este es el enfoque de mapeo propuesto por Yepes-Estrada et al. (2017). La metodología consiste en utilizar variables categóricas de las bases de datos que describen las estructuras y los ocupantes (p. ej., material de construcción o nivel socioeconómico) y utilizarlas para la clasificación. Cuanto mayor sea la cantidad y la calidad de las variables que describen los activos, mejor será la clasificación. Para cada estructura, analizamos variables como el material de la pared, el material de la estructura, el tipo de piso, el tipo de techo, los acabados, el año de construcción, la altura, el propósito económico, el uso principal de la estructura, el área de construcción y el estrato socioeconómico. Cada una de estas variables nos ayuda a determinar un atributo estructural de la edificación. Siguiendo la clasificación de edificaciones propuestas por Silva et al. (2021), determinamos como mínimo los siguientes atributos estructurales:

- **Material constructivo:** es el material predominante del sistema constructivo de la edificación. Los más comunes son la mampostería y sus variantes, el concreto reforzado y la madera. Las variables más importantes para determinar el material constructivo son el material de las

paredes exteriores y el tipo de armazón o estructura exterior. En ausencia de estas, el uso o destino económico de la estructura puede usarse para inferir cuál es el material constructivo (e.g. bodega, escuela, mercado).

- **Sistema resistente a las cargas laterales:** también llamado LLRS (por sus siglas en inglés) es el sistema que resiste la acción de las fuerzas sísmicas. Los más comunes son los muros de cortante y los marcos o pórticos. Las variables más importantes para determinar el LLRS son el material de las paredes exteriores, el tipo de armazón de la estructura y la altura de la edificación.
- **Número de pisos:** es el número de pisos de la edificación y se relaciona directamente con la variable de altura o rango de pisos que se encuentra en la base de datos.
- **Ductilidad esperada de la edificación:** hace referencia a la capacidad de la estructura a soportar cargas laterales sin perder su integridad o poner en riesgo la vida de los ocupantes, los componentes y los contenidos. A mayor ductilidad, mejor el desempeño de la estructura durante un sismo. Por lo general una estructura se clasifica con baja, mediana o alta ductilidad. Como este atributo no se encuentra en ninguna base de datos, por lo general se utilizan variables como el año de la edificación o el estrato socioeconómico de la edificación, el cual se asocia con el código sísmico o la formalidad de la construcción.
- **Tipo de cubierta:** hace referencia a la estructura de la cubierta o techo de la edificación, la cual se clasifica como liviana o pesada. Esta información es relevante ante la amenaza sísmica y volcánica. Se relaciona directamente con la variable de techo o cubierta disponible en la base de datos.

Adicional a los atributos estructurales, también utilizamos las variables categóricas para determinar los atributos de ocupación y valor económico del costo de reemplazo de las estructuras.

- **Ocupación:** la ocupación en el modelo de exposición se refiere al uso de la estructura. Se deriva directamente de las variables de uso o destino económico de la misma. En TREQ hemos clasificado todos los posibles usos en los siguientes atributos de ocupación: residencial, comercial, industrial, institucional, educativo y médico o de salud.
- **Valor del costo de reemplazo:** es el valor económico de la estructura y sus componentes estructurales y no estructurales. Excluye el valor de la propiedad. Se utiliza para estimar las pérdidas en las que puede incurrir el propietario o gobierno en el caso del colapso total de la estructura. El costo de reemplazo puede ser mayor al costo actual de la edificación, si la edificación debe construirse de nuevo tomando en cuenta nuevas previsiones de calidad constructiva y sismo-resistente. El valor de reemplazo de la estructura se estima usando variables como el estrato social, los acabados constructivos, el estado de la edificación y el destino económico de la misma.

En la

Variables categóricas	Atributos estructurales							
	Material	Sistema	Código	Altura	Año	Cubierta	Ocupación	Costo
ACABADOS			X					X
ARMAZON	X	X	X					
CUBIERTA						X		X
ESTADOS								X
MANPOSTERIA	X	X						
PAREDES	X	X						X
TIPO_CONSTRUCCION		X					X	
DESTINO_ECONOMICO			X				X	X
USO_PRINCIPAL	X	X	X				X	X
CAT_ANIO	X		X		X			
CAT_PISOS	X	X		X				

Figura 18 proporcionamos un ejemplo de cómo se usaron las variables categóricas para inferir uno o más atributos estructurales, de ocupación y el costo de reemplazo.

Variables categóricas	Atributos estructurales							
	Material	Sistema	Código	Altura	Año	Cubierta	Ocupación	Costo
ACABADOS			X					X
ARMAZON	X	X	X					
CUBIERTA						X		X
ESTADOS								X
MANPOSTERIA	X	X						
PAREDES	X	X						X
TIPO_CONSTRUCCION		X					X	
DESTINO_ECONOMICO			X				X	X
USO_PRINCIPAL	X	X	X				X	X
CAT_ANIO	X		X		X			
CAT_PISOS	X	X		X				

Figura 18. Variables categóricas de la capa constructiva (columna izquierda) utilizadas para identificar uno o más atributos estructurales, de ocupación y costo de reemplazo (filas superiores), por cada estructura registrada en el catastro del distrito metropolitano.

Los valores de las variables categóricas se asocian a valores de los atributos. Por ejemplo, si la variable de 'uso' de la estructura es 'escuela' en la base de datos, la misma se clasifica con un atributo de ocupación 'EDU' (educativa) en el modelo de exposición. Si la variable de 'material de pared' es 'adobe' en la base de datos, la misma se clasifica con un atributo de material 'ADO' (material constructivo de adobe) en el modelo de exposición. Este proceso se repite hasta que todas las variables categóricas han sido transformadas en atributos estructurales, de ocupación y de costo de reemplazo. La combinación de todos los atributos identificados constituye la clase constructiva final de la estructura.

Para realizar una correcta asociación entre las variables categóricas en las bases de datos y los atributos en el modelo de exposición, es necesario conocer de antemano las principales tipologías estructurales de la ciudad. Por ejemplo, si la variable de 'material de pared' es 'concreto reforzado', la estructura puede ser de pórticos de concreto colado en sitio, o muros de concreto colados en sitio,

muros de concreto prefabricado, entre otros. Para una adecuada clasificación de fragilidad y vulnerabilidad sísmica, es necesario entender cuál de estos atributos es predominante en la ciudad y realizar así una clasificación estructural más cercana a la realidad constructiva de la misma. La identificación de las principales tipologías de la ciudad ha sido detalladamente documentada en el entregable “D2.3.1 - Descripción de las clases de edificación identificadas en las ciudades TREQ”. Aquí se proporciona un resumen principal de los hallazgos del proceso de modelado de exposición proveer contexto.

3.4 Tipologías o clases constructivas predominantes

La mampostería es el material de construcción más utilizado en Quito. El último censo de población y vivienda de Ecuador estimó que en el 2010 más del 75% de las viviendas en Quito tienen bloques de mampostería como material para las paredes exteriores (INEC, 2010). La mampostería se encuentra en toda la ciudad, para varios tipos de ocupación y en diferentes configuraciones. En su configuración más habitual, la mampostería está semiconfinada por elementos de concreto reforzado (denominación CR+CIP/LFINF en la taxonomía de Brzev et al. 2013), y está ligada a la losa de techo o entrepiso con cabos de varilla de acero. En Quito es común encontrar estructuras de mampostería cuya losa de techo queda prevista para convertirse en un futuro piso superior, en cuyo caso la varilla de acero usada para las conexiones se deja prevista y es claramente visible desde la calle (fotografía izquierda en la Figura 19). Por ende predomina en alturas de una, dos y tres plantas (HEX:1, HEX:2, HEX:3), y se encuentra prácticamente en toda la ciudad.



Figura 19. Configuraciones de pórticos de concreto confinando muros de mampostería. Tomado de: Informe Fase 1, Proyecto Sara (EPN, 2016).

La mampostería no confinada se puede encontrar en variantes de ladrillo de arcilla (MUR+CLBRS), ladrillos de hormigón (MUR+CBH), ladrillos de adobe (MUR+ADO) y en menor medida como ladrillos de piedra (MUR+ST). El centro histórico de Quito aún cuenta con una gran cantidad de edificaciones coloniales en estos materiales que se preservan en buen estado. Estas actualmente presentan un uso

mixto residencial y comercial. El material constructivo puede ser de adobe con trama de paja, ladrillo de piedra e incluso bahareque (Centro Histórico de Quito: La vivienda, 1991). Por consiguiente, el sistema sismo-resistente predominante es de muros de corte. Aunque la altura común es de 2 pisos, se pueden encontrar unidades en el rango de 1 a 4 pisos. Tienen cubiertas de teja y material liviano. La combinación del adobe con fibras naturales provee resistencia, sin embargo, dado el nivel de amenaza sísmica de la ciudad, su antigüedad y falta de provisiones sísmicas se puede esperar de las mismas un comportamiento de baja ductilidad. A pesar de esto, muchas de estas estructuras aún se encuentran en buen estado. En la Figura 20 se puede apreciar la evaluación de una estructura de adobe del siglo XVII al año 2020.



Figura 20. Casa esquinera de adobe del siglo XVII, entre las calles Rocafuerte y Quiroga, en el centro histórico de Quito. Tomado de Centro Histórico de Quito: La vivienda (1991) y Google Maps (2020).

Los pórticos de concreto reforzado o los sistemas duales (CR+CIP/LFM y CR+CIP/LWAL, respectivamente) también se utilizan ampliamente, principalmente en construcciones formales y de gran altura (más de 5 plantas), como apartamentos o edificios comerciales. El acero (S) también se encuentra en distrito metropolitano y es ampliamente usado en estructuras de uso industrial (e.g. bodegas, centros de manufactura, acopio y distribución). Se utiliza en menor medida para construcciones de gran altura de más de 8 plantas, y principalmente en naves industriales de una sola planta.



Figura 21. Torre CFN y Torres Santa Fe en el centro de Quito. Tomadas de: Google Maps (2020).

Debe destacarse que en Quito muchas de las edificaciones en las tipologías constructivas anteriormente mencionadas iniciaron como construcciones informales. De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial (POT Quito, 2011) entre 1988 y 1998 los asentamientos informales pasaron a ser más de 400. En las décadas subsecuentes hasta la actualidad la informalidad se ha desacelerado, y muchos asentamientos han pasado por un proceso de reglamentación. Sin embargo, se estima que en la actualidad al menos un 60% de la construcción residencial en el DMQ es informal, y aún la construcción formal no sigue a cabalidad los lineamientos establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (Quito Resiliente, 2017). La construcción informal emplea materiales fuera la norma (e.g. bloques de concreto de baja calidad o materiales de desecho) configuraciones no apropiadas (e.g. paños de mampostería de longitud y altura no permitida, voladizos en segunda planta), y sistemas constructivos vulnerables a los sismos (e.g. muros sin refuerzo, muros sin confinamiento, pisos blandos). Algunas viviendas, formales e informales incrementan el número de pisos de forma no fiscalizada, dejando las previstas necesarias para el incremento modular en altura. Este dinamismo constructivo y la alta informalidad constructiva fueron considerados en la clasificación de las estructuras de la ciudad. Como resultado directo, una parte considerable de las edificaciones fueron clasificadas en clases constructivas con un bajo nivel de desempeño sísmico, lo cual es un factor agravante del riesgo sísmico.

3.5 Modelo de exposición de la ciudad

Como resultado de la clasificación se obtiene el modelo de exposición de la ciudad. Cada estructura en el modelo de exposición tiene los atributos estructurales, de ocupación y de valor de reemplazo completamente definidos. Esta información puede presentarse de diversas formas. En este reporte se presenta la distribución de la población y el valor económico de forma agregada por parroquias y barrios. También proveemos estadísticas referentes al tamaño y costo promedio de las edificaciones de la ciudad, la cuál puede ser de gran ayuda en investigaciones futuras. Por último, hacemos una

presentación de la exposición por zonificación sísmica, la cual ayuda a dimensionar lo que se encuentra en riesgo en las diferentes clasificaciones del suelo de la ciudad.

El modelo de exposición de Quito tiene más de 276,000 estructuras y 2,1 millones de ocupantes. Estos fueron clasificados en 373 tipologías o clases constructivas. Contiene edificaciones residenciales, comerciales, industriales, los centros educativos (jardín de infantes, escuelas primarias, secundarias, universidades y colegios), los centros de atención médica y de salud (farmacias, clínicas y hospitales) e institucionales (oficinas de gobierno, departamentos de policía, departamentos de bomberos). Se incluyen los sectores público y privado. El modelo de exposición contiene 11 zonas administrativas, 65 parroquias y 1045 barrios. En lo referente a la distribución demográfica de la ciudad por región administrativa, las parroquias con más ocupantes son Calderón, Conocoto, El Condado, Quitumbe y Solanda, mientras que a nivel de barrio, entre los más poblados se destacan Comité del Pueblo, Carapungo, San Juan, La Victoria y Colinas del Norte. Las parroquias con la mayor concentración de capital económico y productivo son Iñaquito, Calderón, Conocoto, Quitumbe y Cumbayá. A nivel de barrio, los más destacados son Mariscal Sucre, La Floresta, González Suárez, San Juan y Benalcázar. La Figura 22 muestra la distribución espacial de los edificios y el valor expuesto en cada barrio de la ciudad.

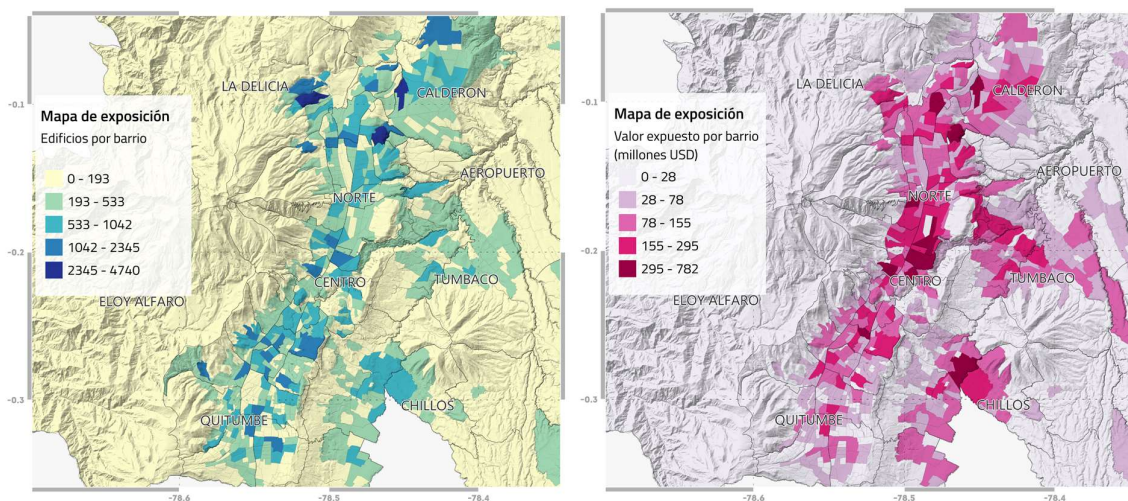


Figura 22. Distribución del número de edificaciones y el valor económico de la ciudad a nivel de barrio.

El valor económico total expuesto estimado para la ciudad es de más de 55 mil millones de dólares (USD\$), la mayoría del cual se encuentra en el sector residencial. El costo promedio de reemplazo por metro cuadrado oscila entre 376 USD/m² y 540 USD/m² en activos residenciales y comerciales. Los activos educativos, gubernamentales y de salud tienen costos de reemplazo más altos que pueden oscilar entre 376 USD/m² y 1680 USD/m². La Tabla 2 muestra las estadísticas principales del tamaño y valor de reemplazo por el tipo de ocupación en la ciudad.

Tabla 2. Estadísticas principales de tamaño y costo de reemplazo de las edificaciones en la ciudad, por tipo de ocupación.

Uso	Valor expuesto (millones USD)	Área promedio (m ²)	Valor mínimo (USD/m ²)	Valor máximo (USD/m ²)	Valor promedio (USD/m ²)
Comercial	\$ 6,061	1,110	\$ 376	\$ 620	\$ 439
Educativo	\$ 1,447	1,753	\$ 376	\$ 620	\$ 438
Salud	\$ 271	2,200	\$ 425	\$ 1,680	\$ 785
Industrial	\$ 1,716	2,056	\$ 376	\$ 1,680	\$ 420
Institucional	\$ 24	893	\$ 376	\$ 620	\$ 425
Mixto	\$ 342	3,163	\$ 376	\$ 620	\$ 439
Residencial	\$ 45,596	394	\$ 376	\$ 1,680	\$ 423
Total ciudad	\$ 55,458	446	\$ 376	\$ 1,680	\$ 424

La distribución de la población y el valor de reemplazo por zona sísmica (ERN, 2012) en el distrito metropolitano se presenta en la *Figura 23. Distribución del número de edificaciones, los ocupantes y el valor expuesto de la ciudad por zona sísmica propuesta en el estudio de ERN (2012)* Figura 23. Quito tiene tres zonas con una concentración de habitantes significativa: MSQ10, MSQ11 y MSQ2. Estas concentran más de 150 mil edificaciones, 30 mil millones de dólares y casi 1 millón y medio de habitantes (el 60% de la exposición de la ciudad considerada en este estudio). La altura de las edificaciones de la ciudad en combinación con la calidad de suelo puede ser un factor agravante en el riesgo sísmico para una ciudad. A ciertas alturas constructivas la aceleración que experimentan las edificaciones debido a un sismo puede ampliarse de forma significativa debido al contenido frecuencial de la onda sísmica. Es por eso que presentamos además la distribución de las edificaciones por su altura en cada zona sísmica de la ciudad. De acuerdo con los resultados de exposición, en las zonas sísmicas MSQ10, MSQ11 y MSQ2 entre el 55% y el 65% del valor económico se encuentra en estructuras de 2 a 4 pisos de altura.

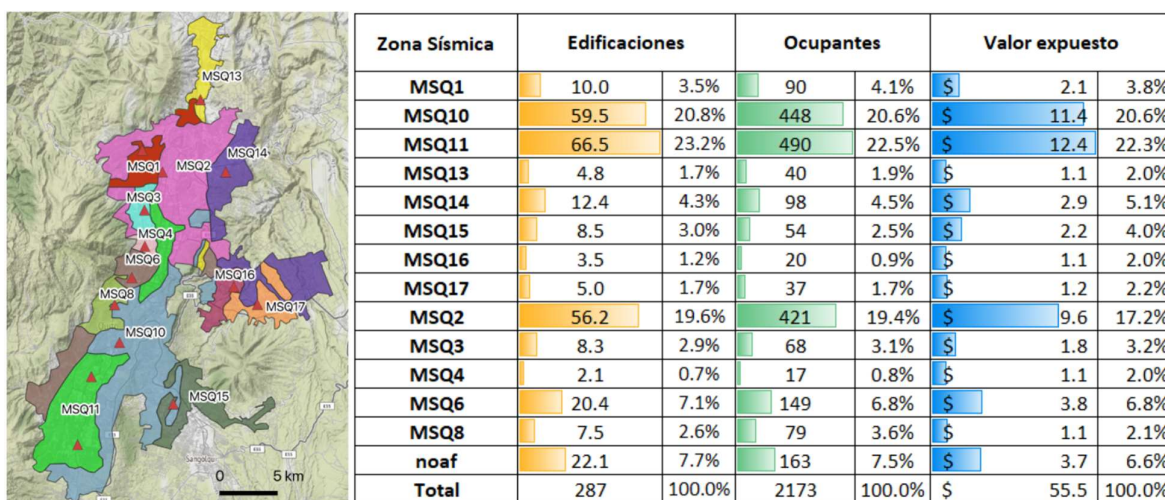


Figura 23. Distribución del número de edificaciones, los ocupantes y el valor expuesto de la ciudad por zona sísmica propuesta en el estudio de ERN (2012).

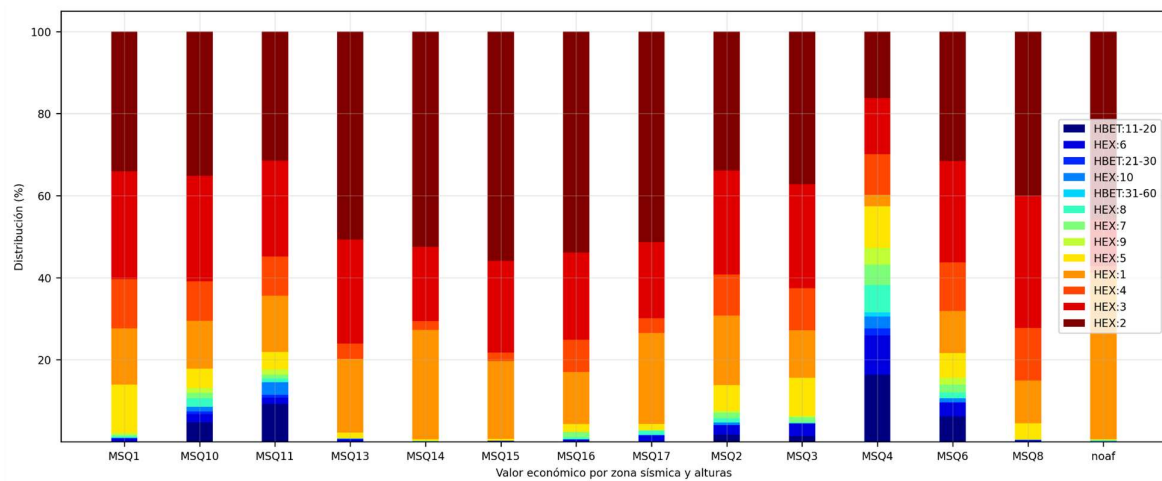


Figura 24. Distribución del número de edificaciones, los ocupantes y el valor expuesto de la ciudad por zona sísmica propuesta en el estudio de ERN (2012). Predominantemente el valor expuesto de la ciudad está en estructuras de 2 a 4 pisos de altura, con la zona MSQ11, MSQ4 y MSQ6 concentrando las edificaciones de gran altura.

4. MODELOS DE VULNERABILIDAD

La evaluación de daños, pérdidas económicas y muertes requiere un conjunto de modelos de fragilidad y vulnerabilidad para las clases de edificios identificadas al modelar la exposición. Una función de fragilidad representa la probabilidad de superar un nivel de daño condicionado a la intensidad de la sacudida del suelo. Estos modelos se utilizan para hacer estimaciones de daños y mapas que indican la distribución espacial del daño de las edificaciones dada la ocurrencia de un evento sísmico. Por otro lado, una función de vulnerabilidad define una distribución probabilística de la tasa de pérdida (por ejemplo, la tasa de pérdida promedio y el coeficiente de variación correspondiente) condicionada a la intensidad del movimiento sísmico. La vulnerabilidad se puede utilizar para estimar pérdidas, como estadísticas y mapas de pérdidas económicas o de muertes humanas.

El uso de modelos de fragilidad y vulnerabilidad que capturan las prácticas de diseño y construcción específicas de la ciudad aún no es posible dado el número limitado de modelos disponibles. Ecuador y Colombia cuentan con estudios previos para diferentes clases de estructuras de mampostería y hormigón (e.g. García y Degrande, 2017; Acevedo et al., 2017) que podrían utilizarse para estimar el riesgo en Quito. Sin embargo, estos se enfocan en la fragilidad estructural y la vulnerabilidad y no pueden usarse para estimar las pérdidas humanas. Además, los modelos en la literatura no cubren las clases de ocupación no residencial, como edificaciones industriales. Por lo tanto, hemos utilizado la base de datos de vulnerabilidad global GEM (Martins y Silva, 2020). Los detalles de la base de datos de vulnerabilidad y los esfuerzos adicionales para desarrollar modelos locales en las ciudades se presentan en las siguientes secciones.

4.1 Base de datos de vulnerabilidad global GEM

La base de datos de vulnerabilidad global GEM es un conjunto de funciones derivadas con metodología uniforme para una amplia gama de clases de edificios. Proporciona curvas de fragilidad que permiten la estimación de daños físicos en edificios, así como un conjunto de modelos de consecuencias para la estimación de índices de pérdidas humanas y estructurales. Además, están disponibles para varios tipos de medidas de intensidad (IMT) que van desde PGA hasta aceleraciones espectrales (S_a) en periodos de vibración de 0,3 segundos, 0,6 segundos y 1 segundo. Proporcionamos como ejemplo la *Figura 25*, que presenta dos modelos de fragilidad. En el panel superior, para mampostería reforzada (MR) y pórticos de concreto reforzado rellenos de mampostería (CR/LFINF), para estructuras de dos plantas (HEX:2), que se han asignado a las edificaciones de la ciudad que pertenecen a estas tipologías constructivas. Las funciones de fragilidad se convirtieron en funciones de vulnerabilidad utilizando el modelo de daño a pérdida propuesto por Yepes-Estrada y Silva (2017) para pérdidas económicas por daño directo. La parte inferior de la misma figura proporciona los modelos de vulnerabilidad resultantes para las mismas dos clases. En estos modelos, los índices de pérdida siguen una distribución beta, lo

que permite la propagación de la incertidumbre del componente de vulnerabilidad a la evaluación del riesgo. Para la derivación de las funciones de vulnerabilidad en términos de pérdida de vidas, primero se estimó la probabilidad de colapso dado un daño completo (a partir de la evidencia de sismos pasados, así como las recomendaciones de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos - FEMA, 2007). Para estimar las fatalidades se adoptaron las proporciones propuestas por Spence (2007). El lector puede encontrar todos los modelos de fragilidad y vulnerabilidad utilizados para TREQ en el entregable “D.2.3.3 Base de datos de funciones de fragilidad y vulnerabilidad”.

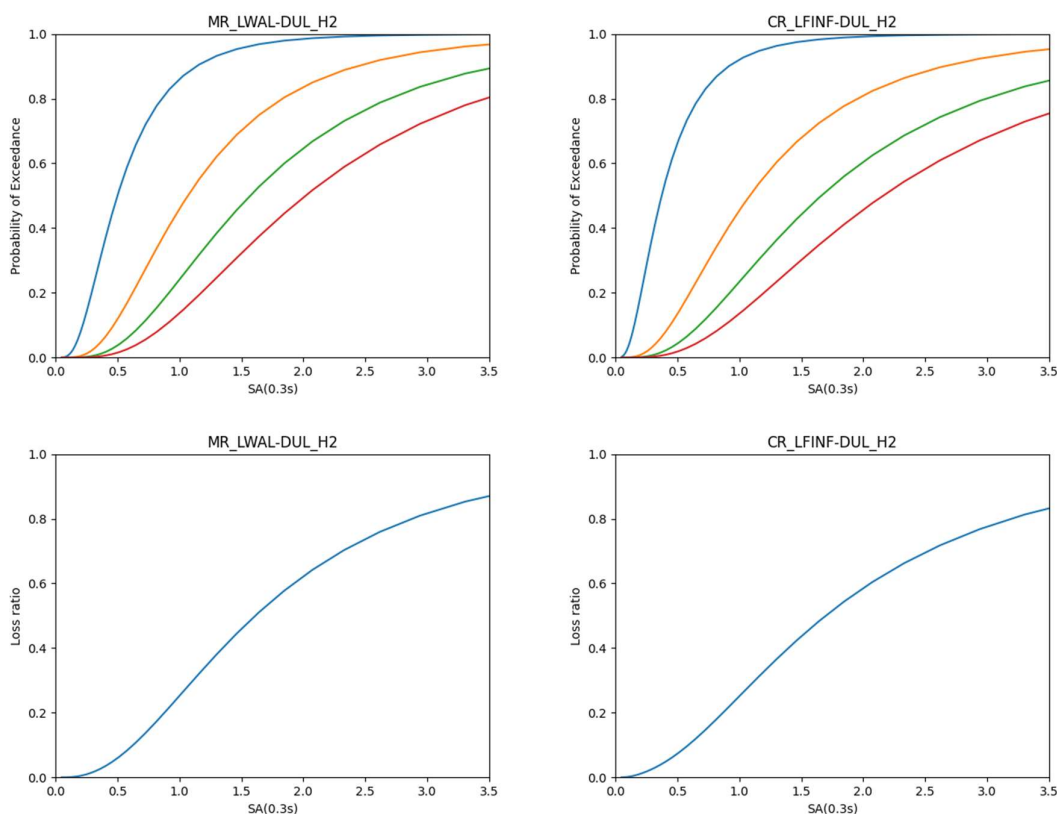


Figura 25. (Arriba) Modelos de fragilidad utilizados para la estimación de daños en edificios para mampostería reforzada (MR) y pórticos de hormigón armado (CR) de baja ductilidad esperada (DUL) y altura de dos pisos (HEX:2). (Abajo) Modelos de vulnerabilidad estructural utilizados para la estimación de pérdidas económicas para las mismas clases de edificios.

Los modelos de fragilidad se desarrollaron teniendo en cuenta la variabilidad entre registros sísmicos, la incertidumbre en el criterio de daño y la variabilidad entre edificios utilizando una metodología analítica para la definición de la capacidad estructural de cada tipología constructiva. En este proceso, se define una curva de capacidad basada en las propiedades estructurales y dinámicas de cada clase de edificio (deriva de fluencia y última, período elástico y de fluencia del primer modo de vibración, factor de participación del primer modo de vibración y mecanismos de falla comunes). Estas curvas de capacidad se utilizaron para desarrollar un oscilador de un solo grado de libertad (SDOF) para cada clase de edificio, y cada oscilador SDOF se sometió a un análisis no lineal utilizando 300 registros de

movimiento del suelo. Para propagar la variabilidad entre registros de movimiento sísmico en los modelos de vulnerabilidad, se utilizó un gran conjunto de registros. La respuesta estructural de los osciladores (usamos el desplazamiento máximo como parámetro de demanda o EDP), se trazó contra el nivel de intensidad de cada registro para establecer una relación entre la demanda y la respuesta, siguiendo el enfoque de análisis de Jalayer et al. (2015), luego se calculó la probabilidad de exceder un conjunto de estados de daño (leve, moderado, extenso y completo) asumiendo un criterio de daño basado en los puntos de fluencia y desplazamiento último, como se describe en Villar-Vega et al. (2017). El rango de intensidad y la probabilidad de exceder los estados de daño se usaron para ajustar una distribución log-normal acumulativa para obtener la curva de fragilidad (Baker, 2015).

Dentro del grupo de curvas de fragilidad y vulnerabilidad de GEM se encuentran las clases de construcción predominantes de mampostería reforzada, mampostería semi-confinada, mampostería sin refuerzo y de concreto reforzado identificadas en el modelo de exposición para la ciudad. Por ejemplo, estructuras de pórticos de concreto reforzado con paredes de mampostería (CR+CIP/LFINF) y mampostería (MR) de baja ductilidad (CDL) que van desde de dos a cuatro pisos (HEX:2 a HEX:4), requieren modelos de fragilidad derivados para períodos de aceleración espectral cortos (periodos de vibración entre 0.1 y 0.3 segundos). Estos mismos se encuentran dentro de las curvas disponibles en la base de datos de GEM.

Para Quito utilizamos un total de 190 modelos de fragilidad y vulnerabilidad sísmica. Con estos modelos es posible hacer estimaciones de daño estructural en las edificaciones, y la afectación de sus ocupantes, incluyendo desplazados, heridos y fatalidades, para cualquier evento sísmico cuya intensidad es conocida (eventos con registros de intensidad) o cuya intensidad es simulada (usando los modelos de movimiento del terreno del modelo de amenaza de la ciudad).

4.2 Desarrollo de modelos locales de fragilidad

Actualmente se están realizando esfuerzos adicionales para desarrollar las funciones locales. Por ejemplo, la fragilidad sísmica de las clases de edificación más importantes está siendo estudiada por grupos académicos de Universidad de las Fuerzas Armadas del Ecuador (ESPE), con base en los hallazgos de los modelos de exposición urbana. La Figura 26 y la Figura 27 presentan dos ejemplos de modelos numéricos para diferentes configuraciones de la clase de construcción de marcos de concreto reforzado con relleno que se encuentran comúnmente en Quito.

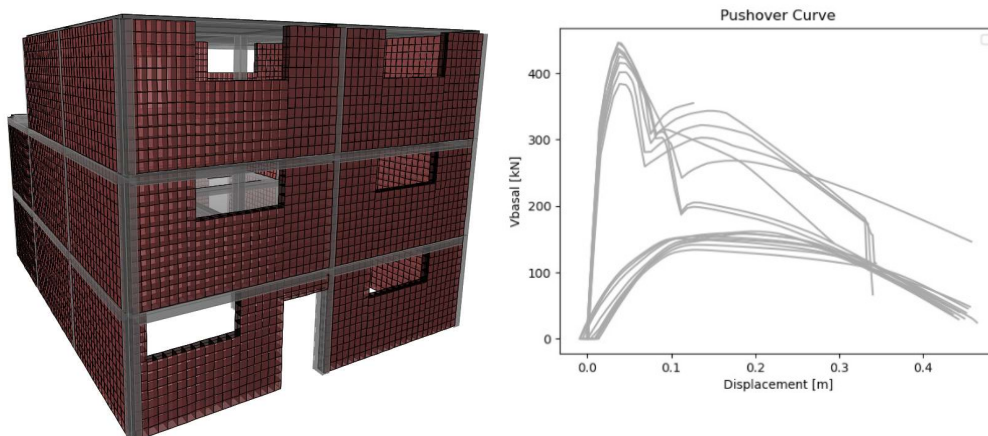


Figura 26. (Derecha) Modelo numérico tridimensional para un edificio de pórtico de hormigón armado relleno de tres pisos de baja y moderada ductilidad que se encuentra comúnmente en Quito. (Derecha) Curvas de capacidad considerando la variabilidad de edificio a edificio en la configuración del sistema de resistencia de carga lateral. Este modelo está siendo desarrollado por Mauricio Guamán y José Poveda en la ESPE en el contexto de las actividades del TREQ con la academia en Quito.

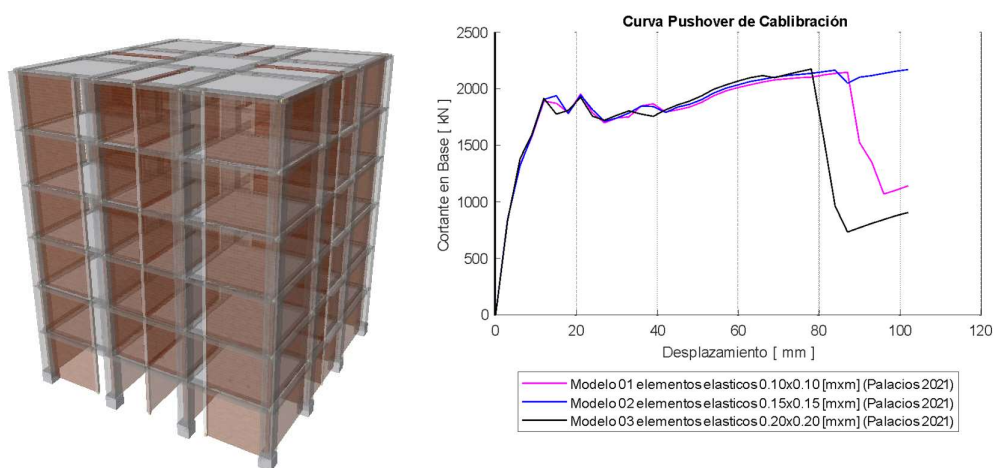


Figura 27. (Derecha) Modelo numérico tridimensional para edificios de pórticos de concreto reforzado con relleno de ductilidad baja y moderada de cuatro a seis pisos que se encuentran comúnmente en Quito. (Derecha) Curvas de capacidad considerando la variabilidad de edificio a edificio en la configuración del sistema de resistencia de carga lateral. Este modelo está siendo desarrollado por Patricio Palacios y Carlos Celi en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, en el contexto de las actividades del TREQ con la academia en Quito.

5. RIESGO SÍSMICO

Con todos los componentes descritos anteriormente es posible hacer una estimación del riesgo sísmico para la ciudad. Es decir, una estimación del daño y las pérdidas económicas y humanas debido al impacto de uno o más eventos sísmicos con potencial destructivo. El modelo de amenaza sísmica de la ciudad caracteriza las fuentes de sismicidad y la frecuencia y magnitud con la que pueden generar sismos destructivos en la región (Sección 1.1). Los modelos de movimiento del terreno en combinación con las funciones de amplificación para la ciudad (Sección 1.2 y Sección 2.3) hacen posible realizar estimaciones de la intensidad con la que podemos sentir dichos eventos en la superficie. El modelo de exposición contiene una descripción completa de las edificaciones expuestas al fenómeno sísmico, incluyendo su ubicación, ocupantes, zona sísmica, clasificación estructural y valor de reemplazo (Sección 3.5). Como cada edificación tiene una clasificación estructural, se le ha asignado un modelo de fragilidad y vulnerabilidad sísmica, con los cuales se puede estimar el nivel de daño y pérdida para cualquier nivel de intensidad sísmica (Sección 4.1). En esta sección, presentamos los dos tipos de métodos que usamos para evaluar riesgo sísmico en la ciudad: el determinista y el probabilista. Con el método determinista, estimamos el riesgo en la ciudad usando un grupo selecto de escenarios sísmicos, cuya ubicación, magnitud, tipo de ruptura y profundidad son previamente definidas. El riesgo estimado para los escenarios provee métricas del impacto total en la ciudad en términos de estructuras colapsadas, desplazados, heridos y fatalidades. Por consiguiente, tiene la intención de apoyar acciones de preparación ante desastres probables. Con el método probabilístico, estimamos el riesgo en la ciudad usando un catálogo representativo de la sismicidad futura de la ciudad, el cual contiene cientos de miles de escenarios. Al analizar el riesgo anualizado durante todo el periodo de sismicidad, el riesgo resultante es independiente de un solo evento. Por lo tanto, puede usarse para apoyar la gestión del riesgo y políticas de mitigación a largo plazo. Para ambos métodos, presentamos la metodología de forma detallada y los resultados obtenidos en esta sección. Los resultados se presentan en forma de perfiles informativos con la información clave para comprender los factores que influyen en el riesgo sísmico a escala urbana. Estos perfiles se encuentran disponibles al final de esta sección.

5.1 Riesgo determinista: escenarios de riesgo para la ciudad

Los escenarios sísmicos generan un entendimiento común de las consecuencias que un terremoto puede causar en una región. Al calcular el riesgo por escenarios se pueden visualizar las áreas más afectadas dentro de la ciudad, el número y la distribución espacial de los edificios colapsados y dañados, las víctimas y las pérdidas económicas ante un evento sísmico. De esta forma, los escenarios permiten identificar debilidades y fortalezas en el sistema de gestión, evaluar las medidas necesarias para reducir el riesgo y mejorar la preparación y recuperación ante eventos futuros.

Las consecuencias de eventos sísmicos pueden cambiar significativamente según las características de ruptura del terremoto, como la magnitud, la profundidad hipocentral y su distancia en referencia a la población expuesta. Como parte de TREQ, realizamos una selección de rupturas sísmicas considerando dos enfoques:

- i) Identificación de eventos históricos relevantes cuya magnitud, tipo de falla y geometría de ruptura son conocidos y de gran peligro para la ciudad.
- ii) Identificando la combinación de distancia, magnitud y fuentes sismogénicas que más contribuyen a la amenaza sísmica en la ciudad, también conocido como proceso de desagregación sísmica.

La selección de escenarios se hizo en conjunto entre GEM, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y el grupo técnico de trabajo de la ciudad. La selección incluye escenarios históricos de interés para la Dirección de Seguridad y escenarios posibles identificados a través del proceso de desagregación que son relevantes para la preparación ante desastres. Este documento proporciona un resumen de la metodología y los eventos seleccionados para la ciudad. El entregable "D2.4.1 Base de rupturas seleccionadas para el análisis de escenarios" incluye el detalle de cada escenario sísmico y los parámetros de ruptura utilizados para la estimación de los escenarios de daño y riesgo. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) proporcionó información detallada sobre la intensidad sísmica de los eventos históricos así como para las simulaciones de los eventos hipotéticos.

Lista de escenarios sísmicos

Quito tiene una larga historia de terremotos destructivos. Varios eventos en el pasado han causado daños significativos en la ciudad. Debido a su antigüedad es difícil contar con registros digitales precisos de su intensidad que permitan simular el impacto de dichos eventos en la actualidad. Por ende el trabajo de selección de escenarios se enfocó en emplear escenarios históricos con información disponible sobre su intensidad, o en su defecto, obtener del proceso de desagregación eventos con el mismo potencial destructivo para la ciudad que los eventos pasados.

Como resultado, para la Quito modelamos dos escenarios históricos para los cuales el USGS tiene simulaciones de la intensidad. Estos dos son el terremoto de subducción en la placa de Nazca 1906, el cuál debido a su magnitud y profundidad, una ruptura similar en la actualidad tendría un potencial destructivo en Quito. El segundo es el terremoto de Muisne de 2016, el cual tuvo un gran impacto en la costa pacífica pero se sintió con fuerza en el distrito metropolitano y dicha intensidad fue reportada en distintos puntos. Modelamos también cinco escenarios identificados por el USGS mediante el proceso de desagregación de la amenaza. Los resultados sugieren que la fuente más notable de sismicidad destructiva es el sistema de la falla de Quito, que se encuentra aproximadamente de 5 a 10 km al oeste de la ciudad. El sistema es una estructura compleja de fallas más pequeñas que pueden producir terremotos de magnitudes mayores a Mw 7.0. Estas magnitudes, cercanas a la ciudad (5 a 10

km) en conjunto con una profundidad superficial (no mayor a los 20 km) gobiernan la amenaza sísmica de la ciudad. Es por eso que seleccionamos 5 escenarios ocurriendo en diversos puntos del sistema, con una profundidad de 8 km, la cuál es una combinación de características altamente adversas para la ciudad, pero plausibles. La Tabla 3 enumera los escenarios y las características principales de las rupturas modeladas.

Tabla 3. Lista de rupturas sísmicas y sus características utilizadas para estimar el riesgo determinista en el distrito metropolitano de Quito. Toda la información referente a la ruptura puede encontrarse en el reporte anexo "D2.4.1 Base de rupturas seleccionadas para el análisis de escenarios".

Evento	Origen	Descripción	Magnitud (Mw)	Profundidad (km)
1	Falla de Quito	Evento Mw6.5 en el centro de la ciudad	6.5	8
2	Falla de Quito	Evento Mw6.5 en el norte de la ciudad	6.5	8
3	Falla de Quito	Evento Mw7.0 en el centro de la ciudad	7	8
4	Falla de Quito	Evento Mw6.5 al sur de la ciudad	6.5	8
5	Falla de Quito	Evento Mw6.5 al oeste de la ciudad	6.5	8
6	Nazca	Terremoto de 1906 Subducción de la Placa de Nazca	8.8	20
7	Manabí	Terremoto de Muisne de 2016	7.8	20

Metodología y suposiciones en el análisis de escenarios sísmicos

Las rupturas sísmicas fueron modeladas usando la calculadora de escenarios del software de OpenQuake desarrollado por la Fundación GEM (Silva et al., 2014). Específicamente, para los escenarios seleccionados usamos estimaciones de cómo se puede sentir la agitación sísmica en la superficie usando la herramienta de Shakemap desarrollada por el USGS (Wald et al., 1999, Silva and Horspol, 2019). En este proceso, al tener las características de cada ruptura, se genera una serie de puntos en la superficie, donde se encuentran los edificios expuestos de la ciudad. Para cada uno de estos sitios se estima la intensidad de agitación máxima del evento usando los modelos de movimiento del terreno presentes en el modelo de amenaza, como si el evento ocurriera en el lecho rocoso. Posteriormente, la intensidad de cada punto se amplifica utilizando las funciones de amplificación de la ciudad, de acuerdo con la zona sísmica, tomando en cuenta así la calidad del suelo local. Como es bien sabido que el cálculo de la intensidad tiene una incertidumbre asociada (es decir, la misma ruptura puede sentirse de diversas formas en la superficie, llamada variabilidad entre eventos), repetimos este proceso 2,000 veces para tomar en cuenta dicha incertidumbre de forma explícita en el análisis de riesgo. Para el caso de los escenarios históricos, si existen registros de cómo se sintió el evento en la superficie, en cada simulación, cerca de estos puntos la incertidumbre se reduce para representar la intensidad registrada. Para cada simulación resultante del evento, hacemos una estimación del impacto en la ciudad. Por consiguiente, obtenemos 2,000 posibles consecuencias para la ciudad, las cuales analizamos para entender cuáles son las más probables (las estimaciones cerca del promedio de todas las simulaciones), las más favorables (las estimaciones cerca del mínimo impacto obtenido) y las más adversas (las estimaciones cerca del máximo impacto obtenido). En este reporte utilizamos

histogramas para presentar todos los resultados de un escenario en una sola figura para cada métrica de riesgo obtenida.

En cada escenario, estimamos el estado de daño final de los edificios para cada una de las simulaciones. Utilizando el daño y los modelos de consecuencias, también calculamos diferentes métricas de riesgo con la intención de dimensionar el impacto total en la ciudad y proveer información útil en diferentes aspectos de la respuesta ante un desastre. A continuación, describimos las suposiciones más importantes en la estimación del impacto en la ciudad:

2. **Evento nocturno:** al modelar la ruptura, asumimos que el evento ocurre en horario nocturno. En este horario, consideramos que el 95% de los ocupantes están dentro de las edificaciones. Esto resulta en el número más elevado de *heridos de gravedad* y *fatalidades* para el evento. En caso de que el evento ocurriera en horario diurno, estas dos métricas serían significativamente más bajas.
3. **Consecuencias directas:** el análisis que realizamos solo captura las consecuencias directas producidas por la agitación del terreno. Las consecuencias debido a fenómenos secundarios que pueden ocurrir durante un evento sísmico, como el deslizamiento de taludes o licuefacción de los suelos, no están incluidas en este análisis. Las pérdidas económicas indirectas, como las pérdidas económicas a causa de la clausura de comercios, manufacturas, servicios educativos y de salud tampoco están incluidas.
4. **Colapsos:** es el número de estructuras que colapsan como consecuencia de la agitación del terreno simulada de acuerdo con los modelos de fragilidad. En los resultados presentamos también el *índice de colapsos*. A nivel de ciudad, el índice representa el porcentaje de todos los edificios expuestos en la ciudad que colapsaron debido al evento. A nivel de parroquia, el índice representa el porcentaje de edificios expuestos en la parroquia que colapsaron debido al evento.
5. **Desplazados:** es el número de ocupantes cuya residencia resultó en estado de daño extenso o completo debido a la agitación del terreno. En ambos estados de daño, se asume que la residencia no es habitable temporal o permanentemente. Por consiguiente, por decisión propia o bajo indicaciones de un ingeniero los ocupantes requieren de un refugio temporal durante la respuesta ante la emergencia.
6. **Heridos de gravedad:** es el número de ocupantes heridos debido al desprendimiento de componentes estructurales y no estructurales que resultan del daño en las edificaciones. Incluye solo las personas que requieren de atención médica urgente debido a heridas de gravedad que ponen en peligro la vida humana.
7. **Fatalidades:** es el número de ocupantes que perdieron la vida debido al desprendimiento de los componentes estructurales y no estructurales que resultan del daño en las edificaciones.

8. **Pérdidas económicas:** es el costo de reparar los elementos estructurales y no estructurales para todos los niveles de daño directo causado por el evento. Las pérdidas consideran que las estructuras deben repararse o reconstruirse siguiendo los lineamientos vigentes de sismo resistencia. Por ejemplo, si una estructura de mampostería sin refuerzo colapsa, el costo de reemplazarla considera que debe ser de mampostería reforzada.

Perfiles de preparación y respuesta ante emergencias

Los resultados para cada escenario se presentan en una serie de perfiles de riesgo de preparación y respuesta ante emergencias. Estos perfiles han sido trabajado en conjunto con el grupo técnico de la ciudad y profesionales en áreas de respuesta ante desastres y ayuda humanitaria. El perfil de preparación y respuesta tiene cuatro elementos principales:

Panel superior: proporciona a la izquierda la información general sobre el evento sísmico (como nombre, ubicación y magnitud), y a la derecha resume principal en términos de edificaciones, población y valor económico expuesto, brindando información sobre el total de habitantes expuestos, el número total de edificios (en diferentes clases de ocupación) y el valor económico expuesto. El panel se muestra en la Figura 28.



Figura 28. Ejemplo del panel superior del perfil, con las características principales de la ruptura del evento sísmico, el número de estructuras, los ocupantes y el valor económico expuesto de la ciudad.

Mapa de colapsos: un mapa que muestra el índice de colapsos en las zonas de la ciudad, donde los colores más rojos indican las parroquias más vulnerables. Esta vulnerabilidad considera la fragilidad física de las estructuras, las características del suelo y las características de la ruptura modelada. Un ejemplo se provee en la Figura 29.

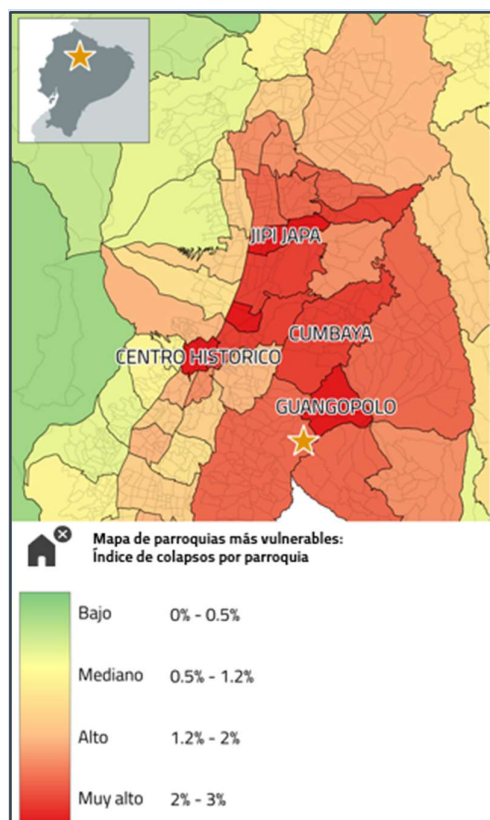


Figura 29. Ejemplo del mapa con la distribución del daño debido al evento, resaltando las comunidades más vulnerables, considerando la fragilidad física de sus estructuras, las características del suelo local y las características de la ruptura modelada.

Tabla de comunidades en alto riesgo: Presenta una tabla con las parroquias más impactadas por el evento, de acuerdo con el índice de daño promedio obtenido de todas las simulaciones del evento. Esta tabla destaca las otras métricas de riesgo obtenidas: el promedio de fatalidades, el promedio de heridos de gravedad, el promedio desplazados y el promedio de pérdidas económicas. Un ejemplo se muestra en la Figura 30.

PARROQUIAS EN ALTO RIESGO				
Parroquias	Índice de colapsos	Fatalidades	Personas heridas de gravedad	Pérdidas económicas (mill. USD)
GUANGOPOLO	3.02%	8	485	1
MARISCAL SUCRE	2.90%	60	5669	499
CENTRO HISTORICO	2.86%	145	2637	378
JIPI JAPA	2.74%	160	3061	433
CUMBAYA	2.49%	116	4277	569
IÑAQUITO	2.46%	189	2896	1119
ITCHIMBIA	2.45%	120	2904	321

Figura 30. Ejemplo de la tabla de comunidades en alto riesgo ante el evento sísmico, mostrando el promedio del resto de métricas de riesgo obtenidos para cada una.

Panel inferior: Proporciona información sobre el impacto total del evento sísmico en la ciudad. El impacto total no debe interpretarse como un resultado único (absoluto), sino como un valor esperado de un rango de posibilidades. Todas las posibilidades están representadas por histogramas. Debido a que realizamos miles de simulaciones, obtenemos miles de resultados de impacto. Los “más favorables” (en los cuales la agitación del terreno es mucho menor de lo esperado para un evento de la magnitud modelada), quedan en el lado izquierdo del histograma. Las “más adversas” (en los cuales la agitación es mucho más severa de lo esperado para dicha magnitud), quedan del lado derecho del histograma. El promedio del histograma presenta los resultados más probables. La Figura 31 muestra el ejemplo de un histograma.

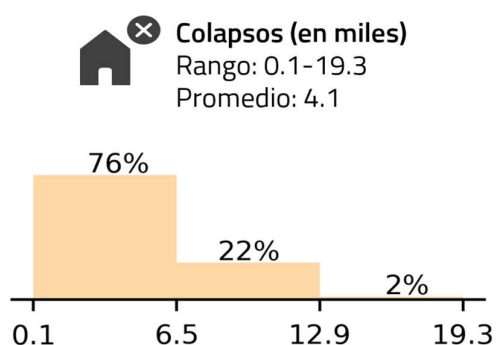


Figura 31. Ejemplo de un histograma de colapsos en la ciudad debido al evento, mostrando el rango de resultados obtenidos para todas las simulaciones. En este ejemplo, el 76% de las simulaciones resultaron en menos de 6,500 colapsos. Menos del 2% resulta en más de 12,900 colapsos. El promedio indica 4,100 colapsos como el resultado más probable.

Limitaciones de los perfiles de riesgo sísmico

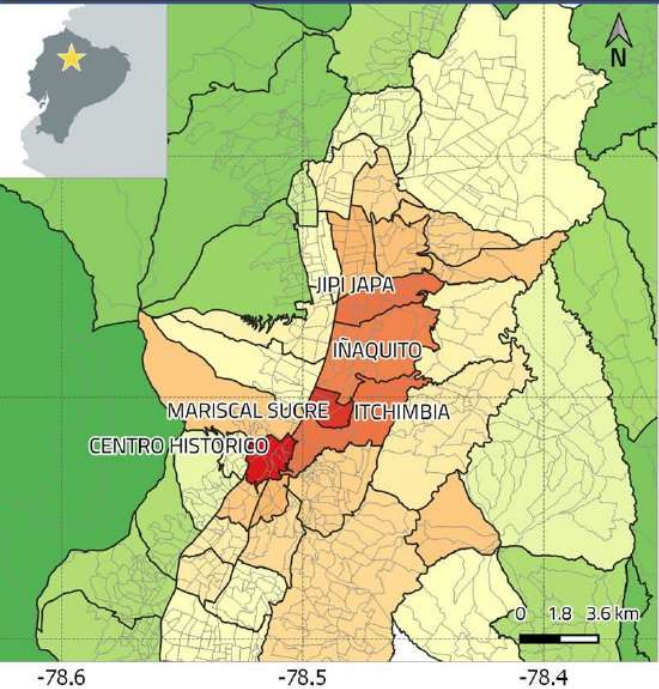
Los perfiles tienen la intención de dimensionar el impacto de un evento sísmico en la ciudad e informar políticas de preparación, mitigación y respuesta de desastres. Estos presentan el riesgo en la ciudad basándose en una caracterización de las estructuras existentes y sus condiciones físicas actuales. Los resultados obtenidos no deben interpretarse como normativa de construcción, planificación urbana o de uso del suelo. No reemplazan la zonificación sísmica o las especificaciones del código sísmico nacional, ni el plan de ordenamiento territorial vigente de la ciudad.

DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

ESCENARIO SISMICO HIPOTETICO
MAGNITUD 7.0 – 8KM PROFUNDIDAD
ORIGEN: CENTRO DE LA CIUDAD

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

Población 3.1 millones	Edificios Residenciales 270 mil	Edificios Comerciales 12 mil	Edificios Educativos 1.8 mil	Edificios Industriales 1.7 mil	Edificios de Salud 104	Edificios de Gobierno 65	Capital expuesto \$55 bill. USD

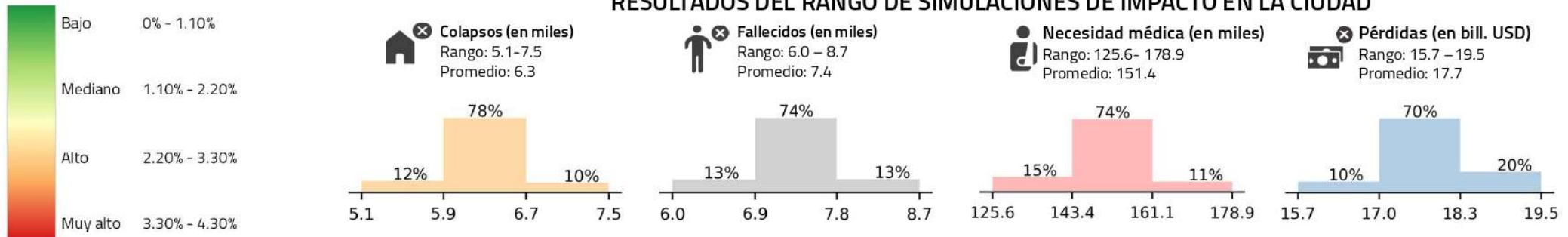


PARROQUIAS MÁS VULNERABLES

Parroquias	Índice de colapsos	Fallecidos	Personas heridas de gravedad	Pérdidas económicas (mill. USD)
CENTRO HISTORICO	4.34%	226	5252	4778
MARISCAL SUCRE	4.12%	88	1766	6285
JUPI JAPA	3.67%	217	4032	5288
ITCHIMBIA	3.63%	182	3745	4317
IÑAQUITO	3.53%	273	5196	15670
CHIMBACALLE	3.13%	204	4099	3390
KENNEDY	3.06%	379	7288	7587
SAN ISIDRO	3.00%	201	4048	4257
ZAMBIZA	2.91%	11	265	251
LA MAGDALENA	2.89%	127	2568	3391
SAN JUAN	2.88%	189	4229	5475
GUANGOPOLO	2.87%	8	163	16
PUENGASI	2.79%	281	5517	4946
LLANO CHICO	2.78%	30	720	789
AMAGUAÑA	2.72%	79	2046	2854

Mapa de parroquias más vulnerables: Índice de colapsos por parroquia

RESULTADOS DEL RANGO DE SIMULACIONES DE IMPACTO EN LA CIUDAD



La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles. Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para el Distrito Metropolitano de Quito en <https://github.com/gem/trq-riesgo-urbano>

DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

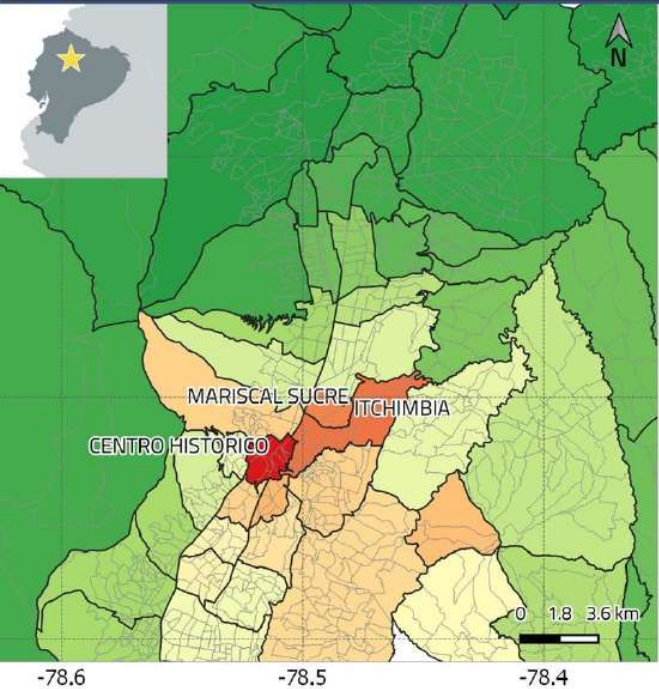
ESCENARIO SISMICO HIPOTETICO

MAGNITUD 6.5 – 8KM PROFUNDIDAD

ORIGEN: SUR DE LA CIUDAD

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

Población	Edificios Residenciales	Edificios Comerciales	Edificios Educativos	Edificios Industriales	Edificios de Salud	Edificios de Gobierno	Capital expuesto
3.1 millones	270 mil	12 mil	1.8 mil	1.7 mil	104	65	\$55 bill. USD

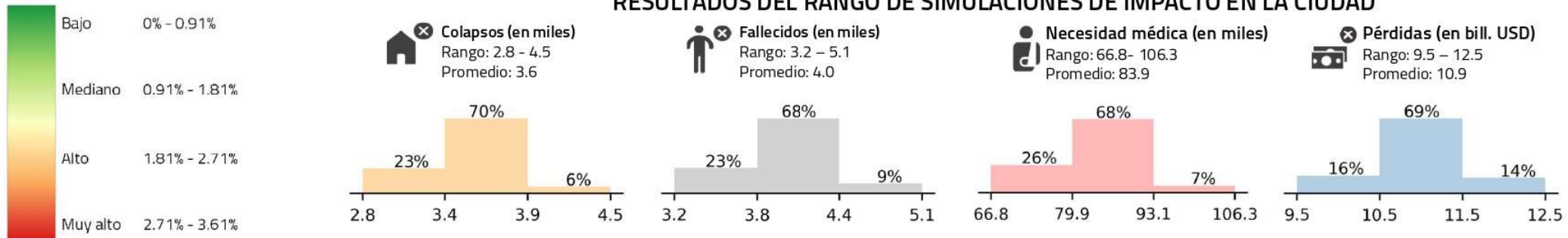


PARROQUIAS MÁS VULNERABLES

Parroquias	Índice de colapsos	Fallecidos	Personas heridas de gravedad	Pérdidas económicas (mill. USD)
CENTRO HISTORICO	3.61%	185	4349	3979
ITCHIMBIA	2.99%	145	3005	3594
MARISCAL SUCRE	2.98%	61	1237	5234
CHIMBACALLE	2.53%	161	3264	2823
GUANGOPOLO	2.53%	6	141	14
AMAGUAÑA	2.38%	68	1788	2377
LA MAGDALENA	2.33%	100	2039	2824
PUENGASI	2.29%	228	4499	4118
SAN JUAN	2.28%	145	3295	4559
CONOCOTO	2.25%	278	5777	11104
LA FERROVIARIA	2.09%	191	4088	3894
SOLANDA	1.97%	268	4990	4618
SAN BARTOLO	1.96%	196	3916	4940
ALANGASI	1.86%	50	1136	3109
TURUBAMBA	1.83%	155	3252	4171

Mapa de parroquias más vulnerables: Índice de colapsos por parroquia

RESULTADOS DEL RANGO DE SIMULACIONES DE IMPACTO EN LA CIUDAD



La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles. Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para el Distrito Metropolitano de Quito en <https://github.com/gem/trq-riesgo-urbano>



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE

Secretaría de SEGURIDAD

Por un Quito Digno



EPMAPS
AGUA DE QUITO

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

USGS
science for a changing world

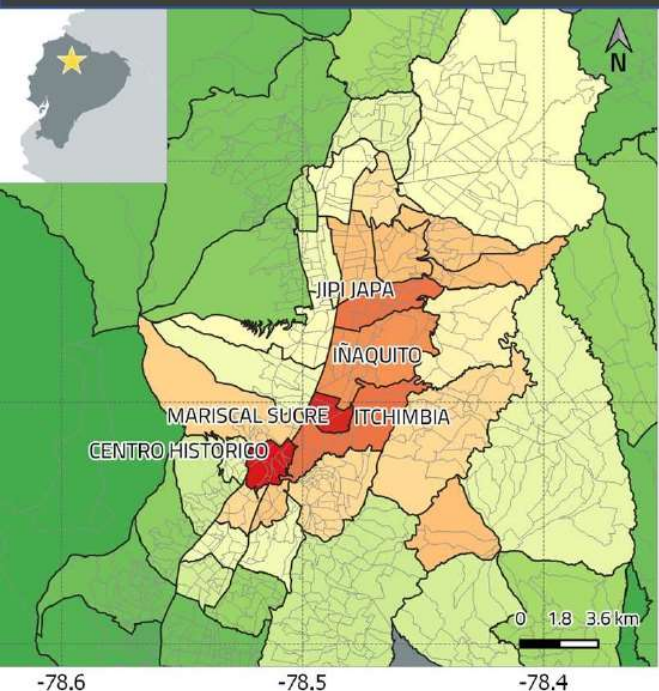
GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

ESCENARIO SISMICO HIPOTETICO
MAGNITUD 6.5 – 8KM PROFUNDIDAD
ORIGEN: NORTE DE LA CIUDAD

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

Población 3.1 millones	Edificios Residenciales 270 mil	Edificios Comerciales 12 mil	Edificios Educativos 1.8 mil	Edificios Industriales 1.7 mil	Edificios de Salud 104	Edificios de Gobierno 65	Capital expuesto \$55 bill. USD

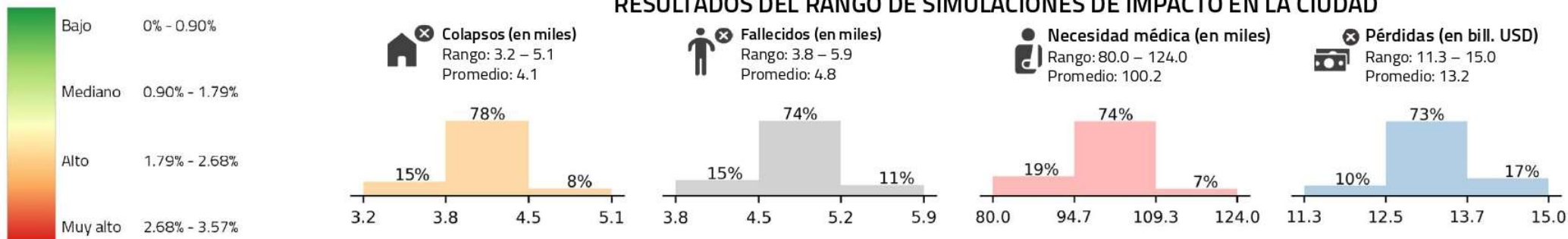


PARROQUIAS MÁS VULNERABLES

Parroquias	Índice de colapsos	Fallecidos	Personas heridas de gravedad	Pérdidas económicas (mill. USD)
CENTRO HISTORICO	3.57%	183	4297	3931
MARISCAL SUCRE	3.43%	70	1405	5171
JIPI JAPA	3.03%	175	3268	4351
ITCHIMBIA	3.02%	149	3079	3552
IÑAQUITO	2.82%	209	3941	12893
ZAMBIZA	2.50%	9	226	207
KENNEDY	2.48%	304	5873	6243
GUANGOPOLO	2.48%	6	136	14
SAN ISIDRO	2.45%	162	3276	3502
CHIMBACALLE	2.37%	151	3061	2789
LLANO CHICO	2.37%	25	610	649
SAN JUAN	2.27%	145	3280	4505
PUENGASI	2.18%	217	4289	4069
LA MAGDALENA	2.18%	93	1898	2790
CUMBAYA	2.16%	102	2083	6451

Mapa de parroquias más vulnerables: Índice de colapsos por parroquia

RESULTADOS DEL RANGO DE SIMULACIONES DE IMPACTO EN LA CIUDAD



La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles. Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para el Distrito Metropolitano de Quito en <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE

Secretaría de SEGURIDAD

Por un QUITO Digno



EPMAPS
AGUA DE QUITO

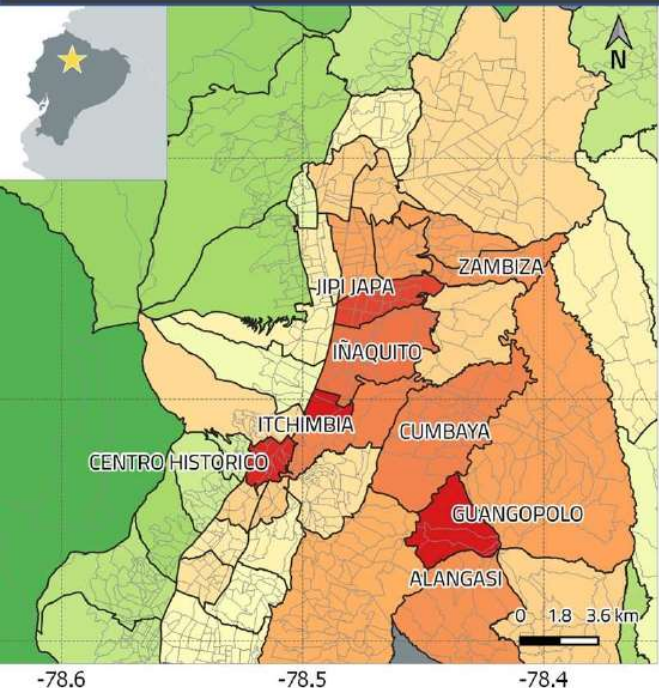


DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

ESCENARIO SISMICO HIPOTETICO
MAGNITUD 6.5 – 8KM PROFUNDIDAD
ORIGEN: CENTRO DE LA CIUDAD

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

Población 3.1 millones	Edificios Residenciales 270 mil	Edificios Comerciales 12 mil	Edificios Educativos 1.8 mil	Edificios Industriales 1.7 mil	Edificios de Salud 104	Edificios de Gobierno 65	Capital expuesto \$55 bill. USD
---------------------------	------------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	---------------------------	-----------------------------	------------------------------------

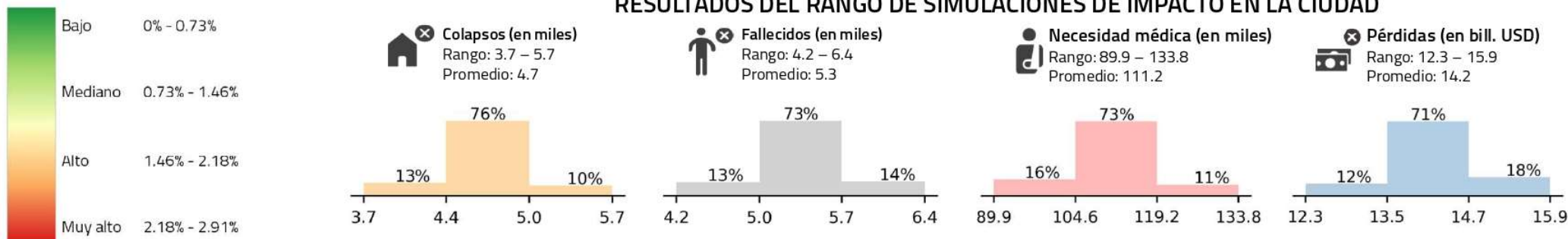


PARROQUIAS MÁS VULNERABLES

Parroquias	Índice de colapsos	Fallecidos	Personas heridas de gravedad	Pérdidas económicas (mill. USD)
GUANGOPOLO	2.91%	8	162	11
MARISCAL SUCRE	2.87%	59	1196	4210
CENTRO HISTORICO	2.78%	141	3338	3201
JIPI JAPA	2.68%	158	2934	3542
IÑAQUITO	2.42%	186	3508	10497
ITCHIMBIA	2.39%	117	2432	2892
CUMBAYA	2.38%	111	2266	5252
ZAMBIZA	2.31%	9	207	168
ALANGASI	2.30%	64	1448	2501
AMAGUAÑA	2.27%	65	1702	1912
TUMBACO	2.25%	146	3534	5092
KENNEDY	2.24%	274	5299	5083
SAN ISIDRO	2.20%	145	2946	2851
LLANO CHICO	2.19%	22	559	529
CONOCOTO	2.17%	266	5535	8933

Mapa de parroquias más vulnerables: Índice de colapsos por parroquia

RESULTADOS DEL RANGO DE SIMULACIONES DE IMPACTO EN LA CIUDAD



La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles. Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para el Distrito Metropolitano de Quito en <https://github.com/gem/trq-riesgo-urbano>

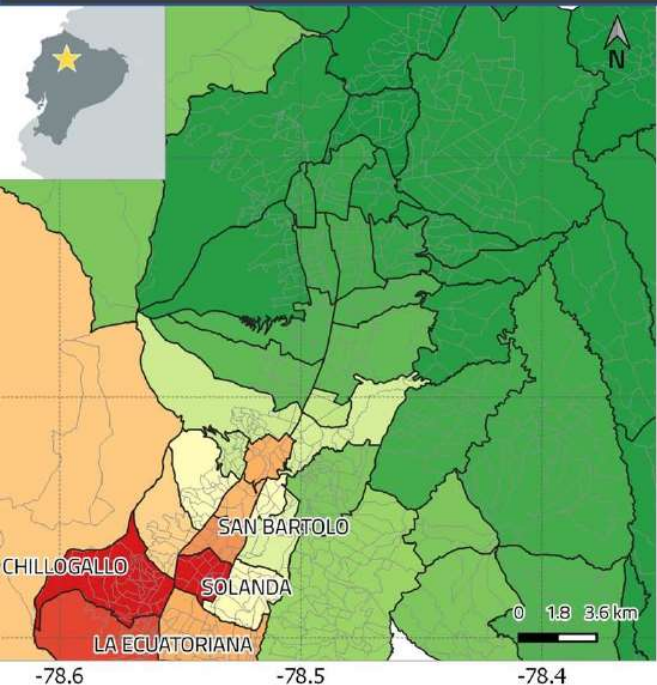


DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

ESCENARIO SISMICO HIPOTETICO
MAGNITUD 6.5 – 8KM PROFUNDIDAD
ORIGEN: OESTE DE LA CIUDAD

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

Población 3.1 millones	Edificios Residenciales 270 mil	Edificios Comerciales 12 mil	Edificios Educativos 1.8 mil	Edificios Industriales 1.7 mil	Edificios de Salud 104	Edificios de Gobierno 65	Capital expuesto \$55 bill. USD
---------------------------	------------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	---------------------------	-----------------------------	------------------------------------

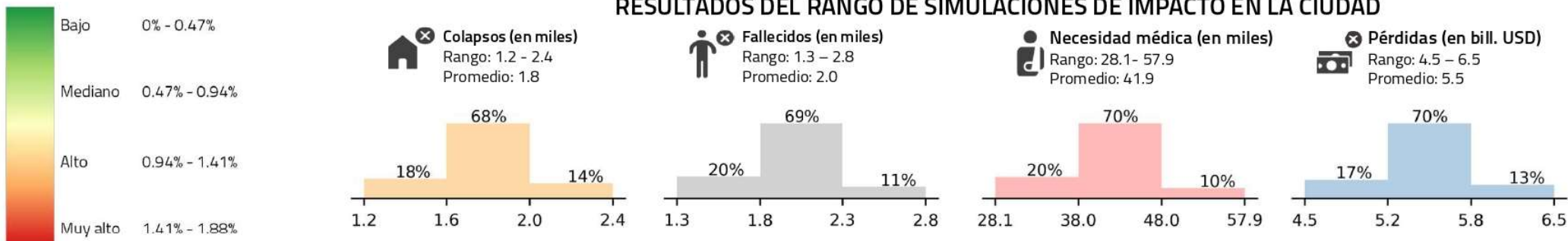


PARROQUIAS MÁS VULNERABLES

Parroquias	Índice de colapsos	Fallecidos	Personas heridas de gravedad	Pérdidas económicas (mill. USD)
SOLANDA	1.88%	260	4847	2406
CHILLOGALLO	1.84%	153	3274	1755
LA ECUATORIANA	1.74%	180	3631	2067
SAN BARTOLO	1.47%	148	2965	2574
CENTRO HISTORICO	1.38%	69	1673	2073
QUITUMBE	1.38%	218	4175	3402
LA MAGDALENA	1.33%	57	1174	1471
LLOA	1.25%	1	36	17
LA MENA	1.18%	84	1677	1497
GUAMANI	1.11%	123	2553	2551
TURUBAMBA	0.99%	88	1839	2173
CHILIBULO	0.98%	61	1364	1637
LA ARGELIA	0.96%	80	1671	1884
CHIMBACALLE	0.94%	58	1220	1471
LA FERROVIARIA	0.76%	67	1486	2029

Mapa de parroquias más vulnerables: Índice de colapsos por parroquia

RESULTADOS DEL RANGO DE SIMULACIONES DE IMPACTO EN LA CIUDAD



La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles. Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para el Distrito Metropolitano de Quito en <https://github.com/gem/trq-riesgo-urbano>



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE

Secretaría de SEGURIDAD

Por un Quito Digno



EPMAPS
AGUA DE QUITO

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

USGS
science for a changing world

GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

TERREMOTO DE 1906

MAGNITUD 8.8 – 20KM PROFUNDIDAD

ORIGEN: SUBDUCCIÓN PLACA DE NAZCA

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

Población
3.1 millones

Edificios Residenciales
270 mil

Edificios Comerciales
12 mil

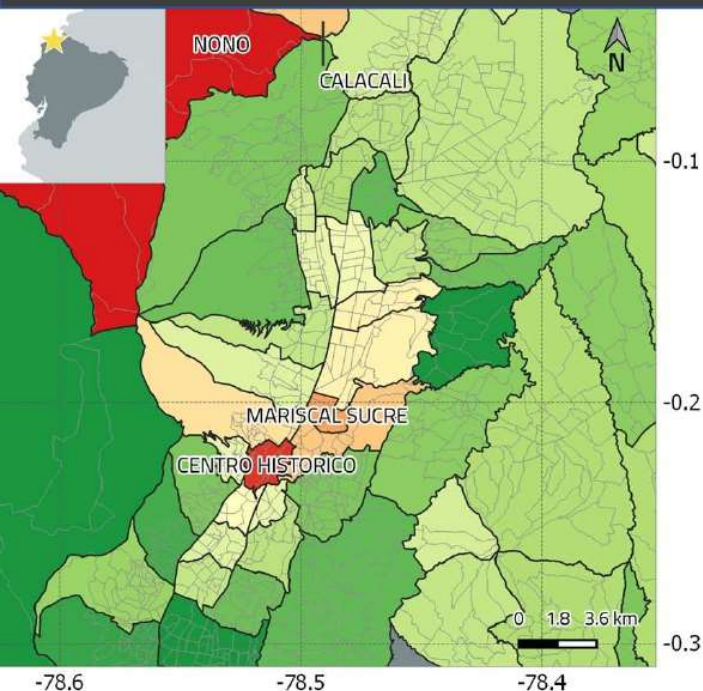
Edificios Educativos
1.8 mil

Edificios Industriales
1.7 mil

Edificios de Salud
104

Edificios de Gobierno
65

Capital expuesto
\$55 bill. USD

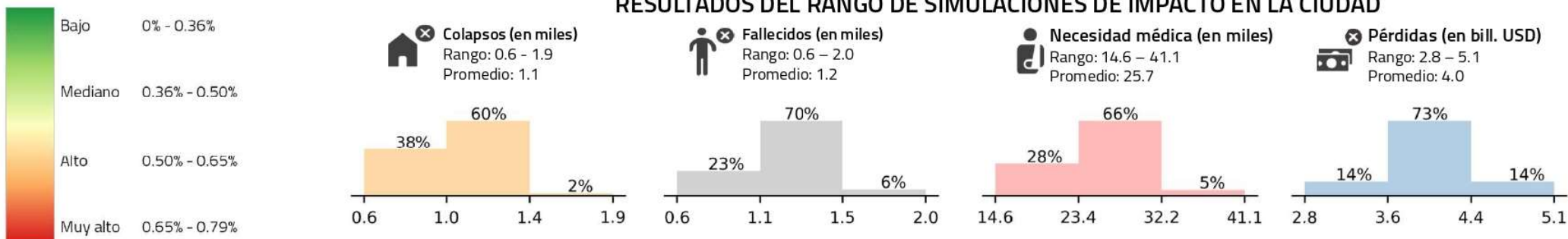


PARROQUIAS MÁS VULNERABLES

Parroquias	Índice de colapsos	Fallecidos	Personas heridas de gravedad	Pérdidas económicas (mill. USD)
NONO	0.79%	0	31	20
CENTRO HISTORICO	0.75%	37	907	875
GUALEA	0.67%	0	8	3
MARISCAL SUCRE	0.66%	13	261	1151
PACTO	0.62%	1	45	16
NANEGAL	0.61%	1	31	9
CALACALI	0.60%	1	77	33
SAN JOSE DE MINAS	0.60%	2	70	50
ITCHIMBIA	0.60%	29	606	790
NANEGALITO	0.57%	1	21	10
SAN JUAN	0.56%	35	812	1003
JIPI JAPA	0.53%	30	570	968
IÑAQUITO	0.53%	38	715	2869
LA MAGDALENA	0.49%	20	411	621
KENNEDY	0.48%	57	1106	1389

Mapa de parroquias más vulnerables: Índice de colapsos por parroquia

RESULTADOS DEL RANGO DE SIMULACIONES DE IMPACTO EN LA CIUDAD



La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles. Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para el Distrito Metropolitano de Quito en <https://github.com/gem/trq-riesgo-urbano>



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE

Secretaría de SEGURIDAD

Por un Quito Digno



EPMAPS
AGUA DE QUITO

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

USGS
science for a changing world

GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

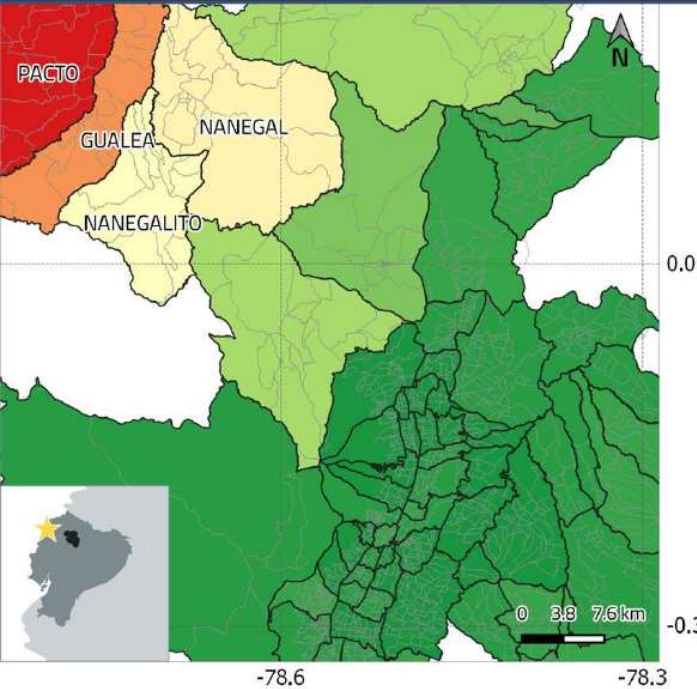
TERREMOTO DE 2016

MAGNITUD 7.8 – 20KM PROFUNDIDAD

ORIGEN: MUISNE

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

Población	Edificios Residenciales	Edificios Comerciales	Edificios Educativos	Edificios Industriales	Edificios de Salud	Edificios de Gobierno	Capital expuesto
3.1 millones	270 mil	12 mil	1.8 mil	1.7 mil	104	65	\$55 bill. USD

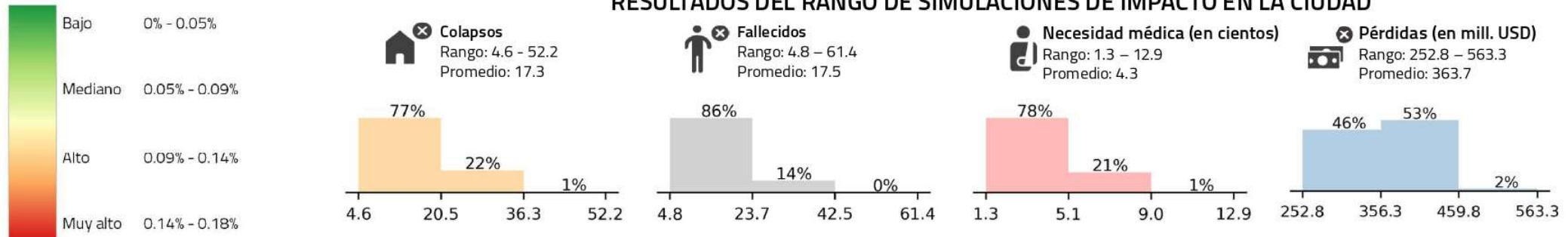


PARROQUIAS MÁS VULNERABLES

Parroquias	Índice de colapsos	Fallecidos	Personas heridas de gravedad	Pérdidas económicas (mill. USD)
PACTO	0.18%	0	12	4
GUALEA	0.14%	0	2	1
NANEGAL	0.10%	0	5	2
NANEGALITO	0.09%	0	2	2
SAN JOSE DE MINAS	0.05%	0	6	12
NONO	0.05%	0	1	5
CALACALI	0.04%	0	6	8
CHAVEZPAMBA	0.03%	0	0	2
SAN ANTONIO	0.01%	1	13	146
PERUCHO	0.01%	0	0	2
CHECA	0.01%	0	2	19
PINTAG	0.01%	0	3	22
AMAGUAÑA	0.01%	0	10	121
ATAHUALPA	0.01%	0	1	6
PUELLARO	0.01%	0	1	10

Mapa de parroquias más vulnerables: Índice de colapsos por parroquia

RESULTADOS DEL RANGO DE SIMULACIONES DE IMPACTO EN LA CIUDAD



La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles. Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para el Distrito Metropolitano de Quito en <https://github.com/gem/trq-riesgo-urbano>

5.2 Evaluación probabilista: eventos estocásticos para la ciudad

Metodología y suposiciones en el análisis de escenarios sísmicos

La evaluación de riesgo sísmico probabilístico para Quito se realizó utilizando la calculadora de riesgo de eventos estocásticos del software de OpenQuake (Silva et al. 2014). El software utiliza el modelo de fuentes sísmicas para la ciudad (Sección 0) para generar varias realizaciones posibles de sismicidad condicionadas a un tiempo de investigación. A estas realizaciones o conjunto eventos se les conoce como conjunto de eventos estocásticos (SES, por sus siglas en inglés). Los eventos se generan utilizando las mismas relaciones magnitud-frecuencia establecidas para cada fuente de sismicidad mediante un proceso de muestreo de Monte Carlo. Cada ruptura generada está totalmente definida por una magnitud, profundidad sísmogénica superior e inferior, hipocentro y ángulos de buzamiento, inclinación y rumbo. Para Quito se generaron 100,000 SES con una duración de 1 año por rama en el árbol lógico del modelo de amenaza. Esto resulta en una simulación de 100,000 años de sismicidad en cada rama, donde cada año puede contener diversos eventos sísmicos. Como cada evento está definido por una ruptura, hacemos simulaciones de cómo se puede sentir el evento en la superficie, en forma de intensidades de agitación, usando los modelos de movimiento del terreno establecidos en el modelo de riesgo de la ciudad (Sección 1.2). Las intensidades se estimaron en el lecho rocoso, y se amplificaron usando las funciones de amplificación desarrolladas para la ciudad (Sección 2.3).

Como resultado de la generación de eventos estocásticos, tenemos una simulación de sismicidad que contiene cientos de miles de eventos sísmicos. Con la intensidad de cada uno, estimamos el impacto total que tienen en la ciudad y en cada uno de los elementos expuestos. Al calcular el impacto asumimos que los eventos han ocurrido independientemente el uno del otro (es decir, no se considera acumulación de daño en las estructuras ni enjambres sísmicos). Los resultados totales para la ciudad los registramos en una *tabla de daños y pérdidas totales*, mientras que los resultados por elemento expuesto los registramos en una *tabla de daños y pérdidas por activo*. Estas tablas contienen todo el daño y pérdidas posibles que pueden ocurrir dentro del periodo de sismicidad simulado. Por ende, las utilizamos para entender el riesgo de tres maneras fundamentales:

1. **El riesgo por periodo de retorno:** la tabla de daños y pérdidas totales tiene el impacto que causa cada uno de los eventos sísmicos en la ciudad. Basándonos en el número de veces con que se exceden ciertos niveles de daño y pérdida en la tabla, podemos estimar qué tan frecuentes son dentro del periodo de investigación. En este reporte presentamos esa frecuencia como un periodo de retorno (cada cuántos años se observan los niveles pérdida en el tiempo de investigación de la sismicidad).
2. **El riesgo anualizado:** es el riesgo que obtenemos al tomar todo el daño y pérdidas registradas durante el periodo de sismicidad y lo dividimos entre la duración del periodo. Debido a que

considera todos los eventos sísmicos, es una estimación del riesgo promedio en que se encuentra la ciudad cada año. Es por eso que el riesgo anualizado es útil para la asignación de recursos y la planificación de la gestión del riesgo a largo plazo.

3. **Comunidades en alto riesgo:** con la tabla de daños y pérdidas por activos, también se puede estudiar el riesgo anualizado por región administrativa. Es decir, sumando las pérdidas de todos los elementos expuestos dentro de una región (e.g. provincia, distrito, barrio, cuadra). Así se identifican cuáles comunidades sufren más daños y pérdidas durante el periodo de sismicidad simulada. En este análisis se resaltan las comunidades más vulnerables debido a la frecuencia con que experimentan los sismos, las características físicas de sus edificaciones y calidad del suelo en que se encuentran.

Perfil de mitigación y gestión del riesgo

Los resultados probabilísticos del riesgo se presentan en este reporte en la forma de un perfil de mitigación y gestión del riesgo. El perfil ha sido elaborado en conjunto con el grupo técnico de la ciudad y profesionales en áreas de respuesta ante desastres y ayuda humanitaria. El perfil de mitigación tiene los siguientes componentes:

Panel superior: proporciona a la derecha un resumen sobre el total de habitantes expuestos, el número total de edificios (en diferentes clases de ocupación) y el valor económico expuesto total de la ciudad.

Mapa de colapsos: Es un mapa con las parroquias con el mayor índice de colapsos. Tiene la intención de resaltar las partes más vulnerables de la ciudad. Esta vulnerabilidad considera la frecuencia de los eventos sísmicos, las características físicas de las edificaciones y calidad del suelo en que se encuentran. Las comunidades que se resaltan en el mapa serían las más beneficiadas por una mejor fiscalización constructiva, campañas de concientización del riesgo sísmico, y estrategias de mitigación a largo plazo.

Tabla de comunidades en alto riesgo: Esta tabla muestra métricas de riesgo adicionales para las parroquias resaltadas en el mapa de colapsos. Las métricas adicionales incluyen el número de personas y valor económico expuesto en las parroquias, las fatalidades anuales promedio, y las pérdidas económicas anuales promedio.

Gráfico de riesgo anualizado: El riesgo anualizado por tipología constructiva se muestra en forma de una gráfica de barras. Las tipologías que más contribuyen al riesgo sísmico se resaltan en el gráfico, mostrando la contribución de cada una a la mortalidad, los daños y las pérdidas económicas anualizadas de la ciudad. De esta forma, dependiendo del riesgo que se desea mitigar a largo plazo, se puede visualizar en cuales tipologías los esfuerzos serían más efectivos.

Gráfico de riesgo por periodo de retorno: El riesgo por periodo de retorno se muestra también en forma de una gráfica de barras. Esta figura presenta la frecuencia con la cuál se esperan eventos destructivos y su impacto en la ciudad para las métricas de riesgo principales: daños (en forma de colapsos), fatalidades y pérdidas económicas. La frecuencia se muestra en la forma de los siguientes periodos de retorno: 50 años, 100 años, 200 años, 500 años, y 1000 años. Esta información puede informar políticas de preparación, gestión y transferencia del riesgo para los eventos sísmicos, dependiendo de su frecuencia e impacto.

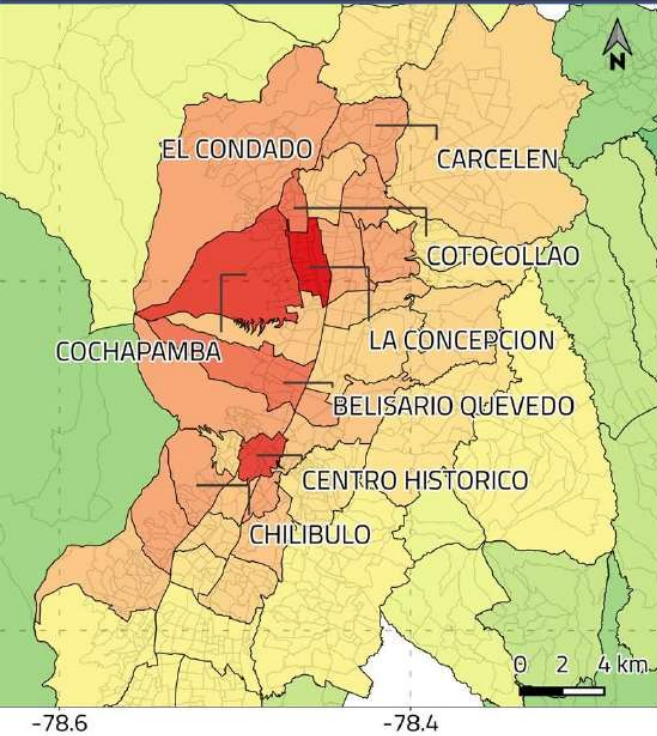


DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

PERFIL DE MITIGACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

Población 3.1 millones	Edificios Residenciales 270 mil	Edificios Comerciales 12 mil	Edificios Educativos 1.8 mil	Edificios Industriales 1.7 mil	Edificios de Salud 104	Edificios de Gobierno 65	Capital expuesto \$55 (bill. USD)
---------------------------	------------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	---------------------------	-----------------------------	--------------------------------------

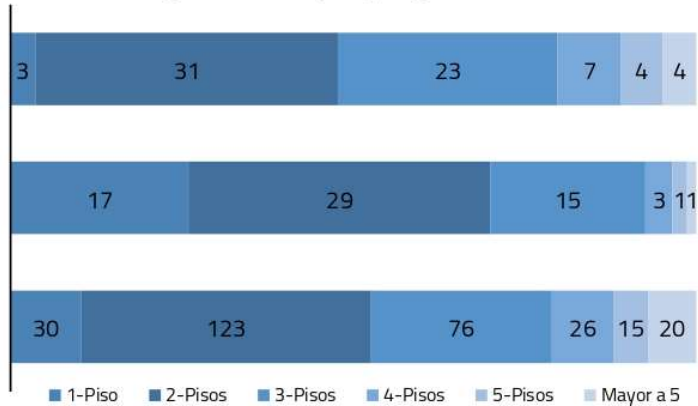
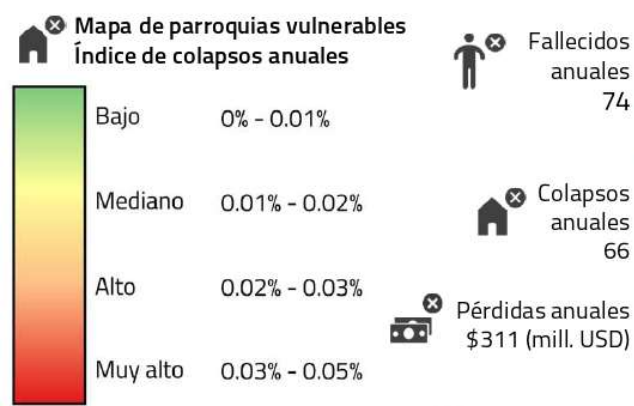


PARROQUIAS EN ALTO RIESGO

Parroquias	Personas expuestas (miles)	Capital expuesto (mill. USD)	Índice de colapsos anuales	Fallecidos anuales	Pérdidas anuales (mill. USD)
LA CONCEPCION	32	1012	0.05%	3	9
CENTRO HISTORICO	41	1101	0.04%	2	9
COCHAPAMBA	57	969	0.04%	3	8
COTOCOLLAO	31	716	0.04%	2	6
BELISARIO QUEVEDO	45	1346	0.04%	2	9
COMITE DEL PUEBLO	46	998	0.03%	2	7
CARCELEN	55	1204	0.03%	3	8
EL CONDADO	83	1574	0.03%	3	10
CHILIBULO	49	869	0.03%	2	5
MARISCAL SUCRE	14	1448	0.03%	0	7
SAN ISIDRO	42	980	0.03%	2	6
LA MENA	44	795	0.03%	2	5

Riesgo anualizado por tipología constructiva

Riesgo por periodo de retorno en años



6. ESCENARIOS VOLCÁNICOS

Dentro del proyecto TREQ se exploraron otras aplicaciones de riesgo a escala urbana para el modelo de exposición de alta resolución que desarrollamos (Sección 3.5). Durante la realización dicho modelo se hizo el esfuerzo de capturar, dentro de los atributos estructurales de las edificaciones, el tipo de cubierta que tienen. En conjunto con la oficina de gestión de riesgos y la alcaldía se hizo la propuesta de utilizar los modelos para generar escenarios de riesgo volcánico ya que, al contar con la caracterización de la cubierta y el techo de las estructuras, es posible emplear el modelo de exposición para estimar el impacto de distintas amenazas volcánicas para la ciudad.

Lista de escenarios volcánicos

Para los escenarios volcánicos usamos seis huellas de amenazas proporcionadas por la DMGR y generadas por el Instituto Geofísico (IGPN). Corresponden a erupciones anteriores de volcanes en la provincia de Pichincha, como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Escenarios de riesgo volcánico para Quito

Volcán	Escenario	Amenazas asociadas
Cayambé	Erupción 1570	Lahares y flujos piroclásticos
Reventador	Erupción 2011	Lahares
Cotopaxí	Erupción 1877	Lahares
Guagua Pichincha	Erupción 1660	Pyroclastic flow
Guagua Pichincha	Erupción siglo X	Lahares
Atacazo Ninahuilca	Erupción 440 AP - (N4)	Caída de ceniza, flujos piroclásticos y lahares

Dos de estos escenarios, la erupción de 1570 y 2011 de los volcanes Cayambé y Reventador no afectan al área metropolitana de Quito. Por otro lado, aunque los flujos piroclásticos de la erupción de Guagua Pichincha del 1660 abarcan gran parte de la Administración Zonal de Eloy Alfaro, en la parte occidental del distrito, el modelo de exposición desarrollado en este proyecto no contiene edificaciones en esta parte de la ciudad. Por consiguiente, este escenario tampoco genera impacto en la ciudad. Sin embargo, el escenario de Cotopaxí, Guagua Pichincha (Lahares) y Atacazo Ninahuilca sí tienen amenazas que afectan significativamente la ciudad.

Metodología y suposiciones de análisis

Al igual que la evaluación de amenaza y riesgo sísmica, la amenaza y el riesgo volcánico es de gran complejidad y tiene considerables incertidumbres asociadas. Los volcanes son sistemas geológicos con la capacidad de generar muchos fenómenos naturales peligrosos y en ocasiones mortales (Edgar et al., 2017). Las erupciones volcánicas pueden implicar múltiples fenómenos con potencial destructivo, en los que una variedad de amenazas volcánicas directas (por ejemplo, flujos de lava, lahares, caída de ceniza y tefra volcánica, y corrientes de densidad piroclástica) o indirectas (terremotos, tsunamis, deslizamientos de tierra e inundaciones) impactan el ambiente construido a escala local, regional y global dependiendo del tamaño y la duración de la erupción.

A pesar de grandes avances recientes en la estimación de la amenaza y el riesgo volcánico, en términos de metodología y herramientas para el análisis (Felpeto et al., 2007), dentro del marco del proyecto TREQ nos limitamos a utilizar las capacidades del software de OpenQuake para hacer evaluaciones simplificadas del impacto que tiene cada escenario volcánico en la ciudad. Para este propósito también usamos el software de OpenQuake (Pagani et al., 2014, Silva et al., 2014). En la metodología implementada en el software, se asume que las amenazas volcánicas pueden ser de dos tipos: no binarias o binarias. La amenaza volcánica no binaria es la ceniza, para la cual se estima como la medida de intensidad a la carga o peso de las cenizas volcánicas al caer en sobre las edificaciones. El peso se determina a partir de la densidad de la ceniza (húmeda y seca) y la altura de la caída (en milímetros) que indica la huella de la caída de ceniza sobre la ciudad. Posteriormente, el peso de la ceniza sobre cada edificación se asocia a una tasa o razón de pérdida indicada en una curva de fragilidad de la estructura de techo. Para los escenarios volcánicos de Quito utilizamos las curvas de fragilidad establecidas por Torres-Corredor et al. (2017), debido a que los tipos de cubierta de la ciudad se pueden asociar directamente a las clases definidas por los autores, que son cubiertas pesadas (como la teja), cubiertas moderadas (como el zinc), cubiertas débiles (como el material de desecho o la paja), y cubiertas de concreto (como las losas de techo).

Todos los demás fenómenos con potencial destructivo se suponen como binarios. Es decir, destruyen por completo (razón de pérdida de 1) el ambiente construido que encuentran a su paso, y no afectan en ninguna medida (razón de pérdida de 0), el ambiente construido que no encuentran. Esta suposición es razonable teniendo en cuenta el impacto devastador de estos los fenómenos como lahares y flujos piroclásticos. Por ende, el impacto que tiene en la ciudad se estima haciendo una superposición de la huella del fenómeno sobre el modelo de exposición, y clasificando las estructuras dentro de la acción del fenómeno en un estado de daño completo, y sus ocupantes como desplazados permanentemente. Bajo esta metodología, no se admite una intensidad de estos fenómenos de forma cualitativa (p. ej., intensidad alta, media o baja). Debido a que por lo general existe un tiempo prudencial entre la ocurrencia de una erupción volcánica y la llegada de los fenómenos destructivos al ambiente

construido, no estimamos heridos de gravedad ni fatalidades como consecuencia directa de las amenazas binarias o no binarias.

Perfiles de preparación y respuesta ante emergencias

Los resultados para cada escenario se presentan en tres perfiles de riesgo de preparación y respuesta ante emergencias. El perfil de preparación y respuesta tiene cuatro elementos principales:

Panel superior (fondo negro): Proporciona a la izquierda la información general sobre los fenómenos de amenaza, el nombre y la ubicación de la erupción. A la derecha resume los bienes expuestos y la población, proporcionando información sobre el total de habitantes expuestos, el número total de edificios (en diferentes clases de ocupación) y el valor económico expuesto de la ciudad.

Panel izquierdo con mapa: Mapa que muestra el impacto relativo en la ciudad a nivel parroquial, en términos de edificaciones destruidas por los diferentes fenómenos volcánicos. En la esquina superior izquierda, se proporciona también un mapa que muestra la huella de acción de los fenómenos amenazantes respecto a la ciudad.

Tabla de parroquias vulnerables: Presenta una tabla con las parroquias más afectadas, e incluye métricas de riesgo adicionales como el número de personas desplazadas, el número de edificios afectados (destruidos) y las pérdidas económicas estimadas. Para el escenario de la erupción del Cotopaxí de 1877, la tabla presenta los barrios más afectados debido a que el evento solo afecta a cuatro parroquias (Conocoto, Guangopolo, Cumbayá, Tumbaco y Nayón).

Panel inferior: Proporciona un resumen de las cuatro métricas de impacto total en la región metropolitana, incluyendo el índice de afectación (porcentaje de edificios destruidos de la parroquia), el total de los edificios destruidos, la población desplazada y las pérdidas económicas.

Limitaciones de los perfiles de riesgo volcánico

Los perfiles volcánicos tienen la intención de mostrar el potencial del modelo de exposición urbana que desarrollamos para la ciudad para hacer estimaciones de riesgo en otros peligros. Como se ha descrito anteriormente, la metodología empleada estimar el impacto de las erupciones volcánicas en la ciudad actúan considerando la que todos los peligros volcánicos ocurren al mismo tiempo cuando ocurre una erupción (es decir, una evolvente de las capas de amenaza). La metodología también es determinista, solo considera erupciones pasadas (no hay escenarios hipotéticos pero posibles) y no considera incertidumbres. Debido a esto, los perfiles de riesgo volcánicos son preliminares y serán evaluados por profesionales del Instituto Geofísico en el futuro para identificar mejorías en las suposiciones de análisis.



DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

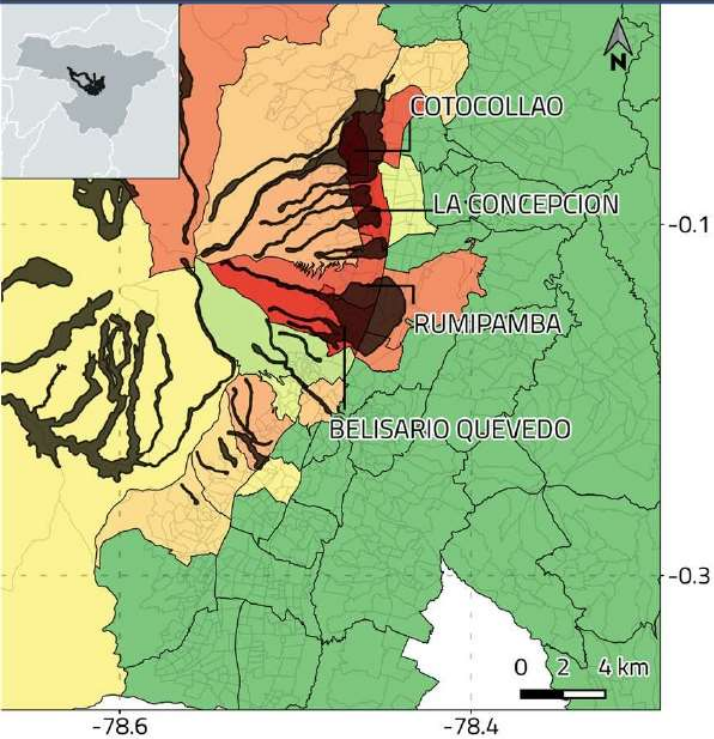
ESCENARIO VOLCÁNICO

ERUPCIÓN GUAGUAPICHINCHA SIGLO X

LAHARES Y FLUJOS PIROCLÁSTICOS

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

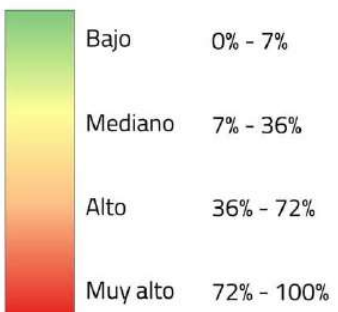
Población 3.1 millones	Edificios Residenciales 270 mil	Edificios Comerciales 12 mil	Edificios Educativos 1.8 mil	Edificios Industriales 1.7 mil	Edificios de Salud 104	Edificios de Gobierno 65	Capital expuesto \$55 bill. USD
---------------------------	------------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	---------------------------	-----------------------------	------------------------------------



PARROQUIAS MÁS VULNERABLES

Parroquias	Índice de afectación	Personas desplazadas (miles)	Estructuras destruidas (miles)	Pérdidas económicas (mill. USD)
COTOCOLLAO	100%	31	3.8	716
BELISARIO QUEVEDO	72%	29	3.9	1059
LA CONCEPCION	68%	22	3.1	638
RUMIPAMBA	51%	15	1.8	733
PONCEANO	43%	22	2.6	517
NONO	36%	0	0.0	3
IÑAQUITO	33%	15	1.7	1567
MARISCAL SUCRE	32%	3	0.9	491
COCHAPAMBA	24%	14	1.2	270
CHILIBULO	20%	9	1.0	162
EL CONDADO	7%	7	1.0	252
CENTRO HISTORICO	4%	2	0.1	42
LA MENA	2%	1	0.2	14
CARCELEN	1%	1	0.1	31
CHILLOGALLO	1%	1	0.1	9

Mapa de parroquias más vulnerables: Índice de afectación por parroquias



IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

Índice de afectación de la ciudad 7.6%	Estructuras destruidas 21,700	Personas desplazadas 173,000	Pérdidas Económicas (mill. USD) \$6,500
--	---	--	---

El índice de afectación es el porcentaje de estructuras expuestas por región que son destruidas debido al los fenómenos volcánico que resulta de la erupción. El número de Fallecidos asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias. Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para el Distrito Metropolitano de Quito en <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>



DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

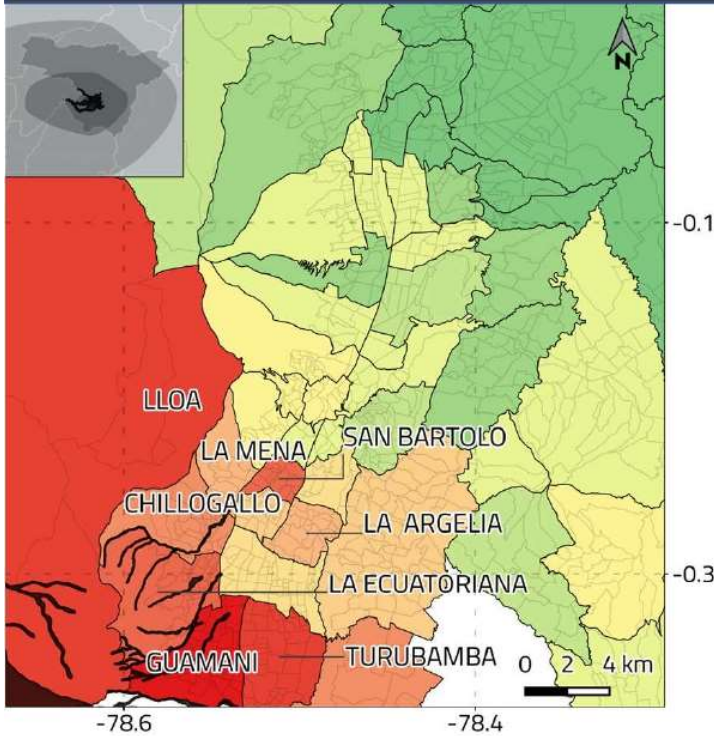
ESCENARIO VOLCÁNICO

ERUPCIÓN ATACAZO NINAHUILCA

LAHARES, FLUJOS Y CAIDA DE CENIZA

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

Población 3.1 millones	Edificios Residenciales 270 mil	Edificios Comerciales 12 mil	Edificios Educativos 1.8 mil	Edificios Industriales 1.7 mil	Edificios de Salud 104	Edificios de Gobierno 65	Capital expuesto \$55 bill. USD
---------------------------	------------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	---------------------------	-----------------------------	------------------------------------



PARROQUIAS MÁS VULNERABLES

Parroquias	Índice de afectación	Personas desplazadas	Estructuras destruidas (miles)	Pérdidas económicas (mill. USD)
GUAMANI	71%	911	8.9	507
TURUBAMBA	58%	0	5.6	342
LLOA	57%	0	0.1	1
LA ECUATORIANA	35%	2402	3.6	140
SAN BARTOLO	30%	0	2.5	27
AMAGUAÑA	29%	0	1.1	39
CHILLOGALLO	28%	2174	2.2	56
LA ARGELIA	26%	0	1.9	26
LA MENA	25%	566	1.5	31
SOLANDA	20%	0	1.8	37
CONOCOTO	18%	0	2.5	95
QUITUMBE	16%	0	1.8	47
LA FERROVIARIA	6%	0	0.4	7
CHILIBULO	6%	0	0.3	8
SAN JUAN	1%	0	0.0	1

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

Índice de afectación de la ciudad 12%	Estructuras destruidas 34,600	Personas desplazadas 6,053	Pérdidas Económicas (mill. USD) \$1,370
---	---	--------------------------------------	---



El índice de afectación es el porcentaje de estructuras expuestas por región que son destruidas debido a los fenómenos volcánico que resulta de la erupción. El número de Fallecidos asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias. Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para el Distrito Metropolitano de Quito en <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>





DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

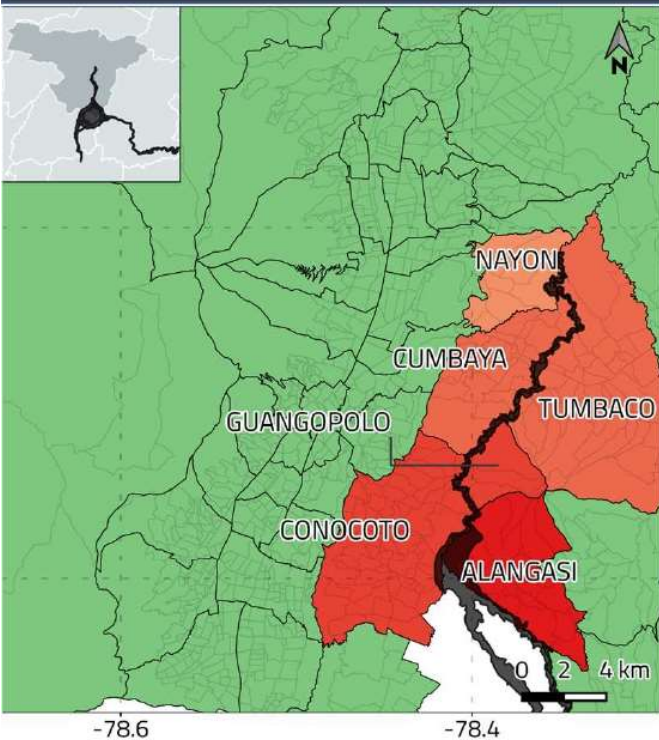
ESCENARIO VOLCÁNICO

ERUPCIÓN COTOPAXI 1877

LAHARES Y FLUJOS PIROCLÁSTICOS

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

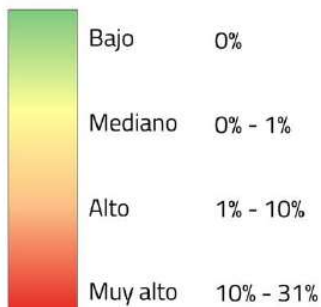
Población 3.1 millones	Edificios Residenciales 270 mil	Edificios Comerciales 12 mil	Edificios Educativos 1.8 mil	Edificios Industriales 1.7 mil	Edificios de Salud 104	Edificios de Gobierno 65	Capital expuesto \$55 bill. USD
---------------------------	------------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	---------------------------	-----------------------------	------------------------------------



BARRIOS MÁS VULNERABLES

Parroquias	Índice de afectación	Personas desplazadas (miles)	Estructuras destruidas (miles)	Pérdidas económicas (mill. USD)
SAN GABRIEL	82%	3075	617	174
PLAYA CHICA	64%	220	113	19
MIRASIERRA	39%	988	287	77
COMUNA RUMILOMA	33%	29	2	0
CUNUNYACU	30%	366	31	9
LA PAZ	19%	326	61	20
COMUNA LA TOGLLA	17%	12	1	0
LA PRAGA	14%	82	3	6
ARMENIA I	11%	279	72	12
ARMENIA II	8%	694	81	26
TOLAGASÍ	6%	279	21	7
SAN CARLOS	4%	61	22	4
SAN JOSÉ DE CONOCOTO BAJO	4%	173	24	9
SAN ANTONIO DE TOLAGASÍ	4%	62	5	1
LA MOYA	3%	150	10	12

Mapa de parroquias más vulnerables:
Índice de afectación por parroquias



IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

Índice de afectación de la ciudad 0.48%	Estructuras destruidas 1,360	Personas desplazadas 6,990	Pérdidas Económicas (mill. USD) \$394
---	--	--------------------------------------	---

El índice de afectación es el porcentaje de estructuras expuestas por región que son destruidas debido a los fenómenos volcánico que resulta de la erupción. El número de Fallecidos asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias. Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para el Distrito Metropolitano de Quito en <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>



7. REFERENCIAS

Alfonso-Naya, V., F. Courboulex, L. F. Bonilla, M. Ruiz, M. Vallée, and H. Yépes (2012). A large earthquake in Quito (Ecuador): Ground motion simulations and site effects, 15th World Conf. on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Number 4475, 10 pp.

Allen, T.I., and Wald, D.J., 2007, Topographic slope as a proxy for global seismic site conditions (VS30) and amplification around the globe: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1357, 69 p.

Alvarado A., Audin L., Nocquet J. M., Lagreulet S., et al., (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*. 33(2): 67-83. doi: 10.1002/2012TC003224.

Ameri, G., Hollender, F., Perron, V., & Martin, C. (2017). Site specific partially nonergodic PSHA for a hard-rock critical site in southern France: adjustment of ground motion prediction equations and sensitivity analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0118-6>.

Aristizábal C, Bard P-Y, Beauval C, Lorito S, Selva J et al (2016). Guidelines and case studies of site monitoring to reduce the uncertainties affecting site-specific earthquake hazard assessment. Deliverable D3.4—STREST—harmonized approach to stress tests for critical infrastructures against natural hazards. <http://www.strest-eu.org/opencms/opencms/results/>

Bazzurro, P. and Cornell, C. A. (2004). Ground-Motion Amplification in Nonlinear Soil Sites with Uncertain Properties. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94:2110–2123, 2004.

Beauval C., J. Marinière, H. Yepes, L. Audin, J.-M. Nocquet, A. Alvarado, S. Baize, J. Aguilar, J.-C. Singaicho, H. Jomard (2018). A New Seismic Hazard Model for Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*; 108 (3A): 1443–1464. doi: <https://doi.org/10.1785/0120170259>

Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, y Vaca, S. (2013). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2a), 773–786.

Edgar C, Cas R, P.H. Olin, Wolff J, Martí J, Simmons J. Causes of complexity in a fallout dominated plinian eruption sequence: 312ka Fasnía Member, Diego Hernández Formation, Tenerife, Spain, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 345, 2017, Pages 21-45, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.07.008>.

Cornell, C. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 58, 1568–1606.

EPN (1994). The Quito, Ecuador, Earthquake Risk Management Project: An Overview. GeoHazards International Publication, San Francisco, USA.

EPRI (2013) Seismic evaluation guidance. Screening, prioritization and implementation details (SPID) for the resolution of Fukushima near-term task force recommendation 2.1. Seismic. EPRI report no. 1025281, December. Palo Alto, CA: Electrical Power Research Institute.

ERN (2012). Microzonificación sísmica del distrito metropolitano de Quito: Estudio de la amenaza sísmica a nivel local.

Global Facility for Disaster Risk Reduction - GFDRR (2014). Open Data for Resilience Initiative: Field Guide. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank 1818 H Street NW, Washington DC 20433. Fuente www.gfdr.org.

Guéguen, P. (1997). Microzonificación de Quito (Ecuador). Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) and Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional.

Felpeto, A., Araña, V., Ortiz, R. et al. Assessment and Modelling of Lava Flow Hazard on Lanzarote (Canary Islands). *Natural Hazards* 23, 247–257 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1011112330766>

Heath, D., Wald, D. J., Worden, C. B., Thompson, E. M., and Scmocyk, G. (2020). A Global Hybrid VS30 Map with a Topographic-Slope-Based Default and Regional Map Insets”, *Earthquake Spectra*, vol. 36, 3: pp. 1570-1584.

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador – INEC (2010). Censo Nacional de Estadísticas y Censos de 2011. Take from www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/

Kamai, R. , Abrahamson, N. A. , and Silva, W. J. , 2014. Nonlinear horizontal site amplification for constraining the NGA-West2 GMPEs, *Earthquake Spectra* 30, 1223–1240.

Kottke, A. and Rathje, E. (2013). Comparison of time series and random-vibration theory site-response methods. *Bull Seismol Soc Am* 103(3):2111–2127.

Laurendeau, A., Courboux, F., Bonilla, L. F., Alvarado, A., Alfonso, Naya V., Mercerat, D., et al. (2017). Low frequency seismic amplification in the quito basin (ecuador) revealed by accelerometric recordings of the RENAC network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(6), 2917–2926.

Leon, A. (2018). Generacion de mapas Vs30 y microzonas sismicas en el distrito metropolitano de Quito, Ecuador, proyecto de grado, Universidad Simón Bolívar.

McGuire, R. K. (2004), Seismic hazard and risk analysis, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda – MIDUVI (2013). Norma Ecuatoriana de la Construcción: Capítulo 2 Peligro Sísmico. Tomado de <https://www.docsity.com/es/nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/5550516/>

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito – MDMQ (2015). Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Tomado de http://www.emaseo.gob.ec/documentos/lotaip_2015/s/actas_y_resoluciones/Plan_Metropolitano_Desarrollo_y_Ordenamiento_Territorial_DMQ_2015_2025.pdf

Pagani M, Monelli D, Weatherill G, Danciu L, Crowley H, Silva V, Henshaw P, Butler L, Nastasi M, Panzeri L, Simionato M, Viganò D (2014). OpenQuake Engine: an Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. *Seismol Res Lett* 85:692–702

Rathje, E. M., and M. C. Ozbey (2006). Site-specific validation of random vibration theory-based seismic site response analysis, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 132, no. 7, 911–922.

Rodriguez-Marek A, Rathje EM, Bommer JJ, Scherbaum F and Stafford PJ (2014) Application of single-station sigma and site response characterization in a probabilistic seismic hazard analysis for a new nuclear site. *Bulletin of the Seismological Society of America* 104(4): 1601–1619.

Silva V, Crowley H, Pagani M, Monelli D and Pinho R (2014) Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Natural Hazards* 72(3): 1409–1427.

Silva, V, Horspool, N. Combining USGS ShakeMaps and the OpenQuake-engine for damage and loss assessment. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 2019; 48: 634– 652. <https://doi.org/10.1002/eqe.3154>

Torres-Corredor, R.A., Ponce-Villarreal, P., y Gómez-Martínez, D.M. 2017. Vulnerabilidad física de cubiertas de edificaciones de uso de ocupación normal ante caídas de ceniza en la zona de influencia del volcán Galeras. *Boletín de Geología*, 39(2): 67-8. doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v39n2-2017005>.

Tromans, I.J., Aldama-Bustos, G., Douglas, J., Lessi-Cheimariou, A., Hunt, S., Daví, M., and Robertson, C. (2019). Probabilistic seismic hazard assessment for a new-build nuclear power plant site in the UK. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(1), 1-36. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0441-6>.

Villagómez, D. (2003). Evolución geológica Plio-Cuaternaria del Valle Interandino central en Ecuador (zona de Quito-Guayllabamba-San Antonio), Eng. Thesis, Escuela Politécnica Nacional-Facultad de Geología, Quito Ecuador, 133.

Wald D, Quitoriano V, Heaton T, Kanamori H, Scrivner C, Worden BC. Trinet "ShakeMaps": rapid generation of peak ground-motion and intensity maps for earthquakes in southern California. *Earthquake Spectra*. 1999; 15: 537- 556.

Yepes, H., L. Audin, A. Alvarado, C. Beauval, J. Aguilar, Y. Font, and F. Cotton (2016). \, *Tectonics* 35, doi: 10.1002/2015TC003941

Yepes-Estrada C, Silva V, Valcárcel J, Acevedo A.B, Tarque N, Hube M.A, Coronel G, and Santa María H, "Modelling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment ", *Earthquake Spectra*, Vol. 33, No. 1, 2017, pp. 299-322.