



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

Evaluación del Riesgo Sísmico a Nivel Regional para Edificios Residenciales en Santiago de Chile

Tesis de Grado presentada por

Alexis Contreras R.

como requisito parcial para optar al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía
Pablo Heresi V.

MAYO, 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación del Riesgo Sísmico a Nivel Regional para Edicios Residenciales en Santiago de Chile

Nombre del candidato(a): Alexis Ignacio Contreras Rodríguez

Carrera / Grado: Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín **Departamento:** Departamento de Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Cristian Emanuel Cruz Doggenweiler, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 17/04/2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 17/04/2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

Evaluación del Riesgo Sísmico a Nivel Regional para Edificios Residenciales en Santiago de Chile

AUTOR:

Alexis Ignacio Contreras Rodríguez

TRABAJO DE TESIS, presentado como requisito parcial para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Profesor Guía	Pablo Heresi V.
Miembro 1 Comisión	Cristian Cruz D.
Miembro 2 Comisión	Claudio Sepúlveda C.

Santiago, Chile, 10 de Abril del 2026

Resumen

La evaluación del riesgo sísmico a nivel regional es esencial para la gestión de riesgos a gran escala, la respuesta a desastres y la planificación urbana. Estos análisis se basan en el conocimiento de los activos estructurales dentro de un área de forma georreferenciada. Este inventario se conoce comúnmente como Modelo de Exposición. Dado el rápido crecimiento de las ciudades y la falta de seguimiento de las características de los edificios, no existe un inventario público detallado de todas las estructuras en la mayoría de las ciudades. Por lo tanto, en este estudio se propone un modelo de exposición basado en huellas de 9,793 edificios residenciales del área urbana de Santiago, Chile. El modelo se desarrolló utilizando conjuntos de datos de código abierto para estimar la altura, el número de pisos, el número de viviendas, la población en cada edificio, el año de construcción, la era de diseño, propiedades geotécnicas del suelo y otras características relevantes para evaluar el riesgo sísmico. Además, este estudio proporciona estimaciones de variables de decisión regionales importantes para las partes interesadas, utilizando el marco de ingeniería sísmica basada en el desempeño a nivel regional (RPBEE) para un escenario sísmico específico. Estas variables incluyen el número de edificios colapsados y el número de viviendas perdidas debido a colapso. Estas variables se desagregan por comunas, tipologías y era de diseño, encontrando variaciones espaciales significativas en las métricas de riesgo sísmico.

Keywords: regional seismic risk, performance-based earthquake engineering, exposure models, probabilistic models

1. Introducción

Entre los países de la OCDE, Chile ocupa el primer lugar en pérdidas anuales debidas a desastres naturales, perdiendo en promedio el 1 % de su PIB cada año (OECD, 2012). Durante los últimos setenta años, Chile ha experimentado ocho terremotos de magnitud superior a M_w 8.0 (Ruiz & Madariaga, 2018). El terremoto de Maule de M_w 8.8 en 2010 afectó aproximadamente al 75 % de la población de Chile (4 millones de hogares o 12 millones de personas), resultando en más de 800,000 personas heridas, fallecidas o desplazadas, lo que representa casi el 7 % de la población, incluyendo 524 víctimas fatales, 181 de las cuales se debieron al tsunami (Contreras & Winckler, 2013; Elnashai et al., 2010; Lagos et al., 2012; USGS, 2011). Las pérdidas económicas superaron los US\$30 mil millones (18 % del PIB en 2010), donde el 70 % provino de daños a estructuras residenciales y el 30 % de pérdidas indirectas, además de US\$1.7 mil millones adicionales en gastos de emergencia (de la Llera et al., 2017). Cuarenta hospitales y ciento treinta establecimientos educativos resultaron gravemente dañados (Comerio, 2014; Ministerio de Educación, 2013). Entre los edificios residenciales de gran altura, 1 colapsó por completo y 40 sufrieron daños graves, lo que representa el 2.1 % de los edificios con más de nueve pisos en la zona afectada (Comerio, 2014; Jünemann et al., 2015; Lagos et al., 2012; Wallace et al., 2012). Actualmente, 25 % de los habitantes del área metropolitana de Santiago, la capital de Chile, reside en departamentos (INE, 2018), los cuales están bajo el riesgo constante de sufrir eventualmente pérdidas similares o peores. Esta cifra alcanza incluso más del 70 % de los habitantes en algunas comunas.

Para mitigar el impacto de futuros terremotos, diversos actores públicos y privados involucrados en la gestión del riesgo sísmico requieren cuantificar variables de decisión regionales esenciales junto con su distribución espacial. Esto con el fin de planificar, programar y ejecutar medidas prácticas de gran impacto social de manera informada (Poland, 2009). Por ejemplo, dentro del contexto chileno:

- (I) El gobierno puede estar interesado en conocer el número esperado de edificios colapsados, o qué comuna perderá el mayor porcentaje de viviendas u hogares.
- (II) Las Direcciones de Obras Municipales (DOM) pueden querer saber qué rango de pisos de edificios es más probable que colapse más, para así poder limitar la altura dentro de su jurisdicción.
- (III) Los equipos de Búsqueda y Rescate Urbano (SENAPRED) pueden necesitar identificar las áreas donde se espera el mayor número de colapsos de edificios, para priorizar el despliegue y salvar tantas vidas como sea posible.
- (IV) Las compañías de seguros y financieras pueden requerir información sobre el daño esperado a las propiedades para hacer más eficientes sus modelos de riesgo económico y ajustarlos para sus clientes.
- (V) Los gobiernos locales pueden querer entender el impacto potencial en sus comunidades para priorizar los esfuerzos de recuperación.

Entender estos aspectos es crucial para desarrollar estrategias efectivas de mitigación de riesgos y asignar recursos de manera eficiente. También es de interés para el gobierno si existen disparidades espaciales para la priorización territorial (Gajardo, 2022) o en la calibración de parámetros de diseño sísmico para asegurar un nivel uniforme de riesgo dentro y entre ciudades (Heresi & Miranda, 2023a).

Dado que es virtualmente imposible predecir determinísticamente los impactos de futuros terremotos y mitigar perfectamente sus efectos, es preferible usar un enfoque probabilístico para incorporar y propagar incertidumbres en cada etapa de la estimación de las métricas de riesgo. Una formalización probabilística para evaluar el riesgo sísmico es el marco de trabajo de la *Ingeniería Sísmica Basada en el Desempeño (PBEE)*, por sus siglas en inglés (Moehle & Deierlein, 2004), desarrollado por el *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)*. La metodología se divide en etapas —Amenaza, Vulnerabilidad, Pérdidas—, basada en la Ley de Probabilidades Totales y la suposición de Cadena de Markov, integra cuatro variables aleatorias: *Medida de Intensidad (IM)*, *Parámetro de Demanda de Ingeniería (EDP)*, *Medida de Daño (DM)*, *Variable de Decisión (DV)*. Este marco, tal como fue concebido originalmente, funciona para estructuras individuales. Sin embargo, más recientemente, Heresi y Miranda (2023b) propusieron una extensión del PBEE para analizar estructuras distribuidas espacialmente (ciudades) añadiendo una nueva variable aleatoria: *Variable de Decisión Regional (RDV)*. Esta extensión se conoce como *Ingeniería Sísmica Basada en el Desempeño a Nivel Regional (RPBEE)*.

El primer desafío al evaluar las métricas de riesgo sísmico regional es la ausencia de un *Modelo(s) de Exposición*. Esto se refiere a la falta de un inventario completo de estructuras en las ciudades con todas las propiedades requeridas para realizar un análisis de riesgo sísmico. La inexistencia de estos modelos se debe principalmente a la rápida urbanización que las ciudades han experimentado en las últimas décadas, lo que ha hecho imposible recolectar y mantener una base de datos con la información de cada estructura (Taubenböck et al., 2024). Existen esfuerzos previos para desarrollar modelos de exposición. Por ejemplo, Aravena et al. (2021) desarrollaron una herramienta de deep-learning para identificar la tipología de 204,000 estructuras desde imágenes de Google Street-View. Este modelo tiene limitaciones como el número de muestras y, dado el uso de imágenes de vista de calle, no todos los edificios son visibles. Por otro lado, la ubicación georreferenciada de la estructura está en la calle, lo que dificulta agregar datos censales con precisión. Adicionalmente, solo contiene

información del arquetipo de edificio que se detectó. Santa María et al. (2017) desarrollaron un inventario de edificios a nivel nacional, e inventarios a nivel local para las ciudades de Iquique, Rancagua y Osorno. Utilizaron los datos del censo de 2012 y el modelo para Santiago tiene una resolución de manzanas censales. Este si tiene información como cantidad de habitantes, pero es de baja resolución. Esfuerzos globales realizados por Copernicus, también han contribuido con múltiples rasters con diversa información, como la altura de los edificios (Pesaresi et al., 2024). Desafortunadamente, la resolución de sus imágenes no es suficiente para un modelo de exposición detallado y preciso.

Un estudio previo realizado por Hussain et al. (2020) estudió la Región Metropolitana de Chile, produciendo mapas de las pérdidas esperadas para cada comuna tales como número de colapsos, pérdidas económicas y número de víctimas fatales. Sin embargo, el estudio presentó varias limitaciones importantes: la obsolescencia y baja resolución de los datos de exposición y suelos comprometen la precisión local, mientras que el modelo de vulnerabilidad —calibrado a escala continental— no refleja las particularidades de los edificios residenciales chilenos. Adicionalmente, la ausencia de modelos de movimiento del suelo (ground motion models) y correlaciones calibradas específicamente para la zona de subducción chilena limita la validez de las simulaciones.

En este estudio, se propone un modelo de exposición para edificios residenciales de más de cinco pisos en Santiago, Chile, para el año 2023; y un análisis de riesgo sísmico regional para el escenario sísmico de una repetición del terremoto del Maule del 2010. El modelo de exposición es edificio a edificio (no en manzanas) y se centra en las características estructurales, del sitio y sociales para evaluar el desempeño general a nivel regional. Incluye atributos como altura, número de pisos, propiedades geotécnicas del sitio, año de construcción y era de diseño, número de habitantes y número de viviendas y hogares en los edificios. La primera sección describe el modelo de exposición, incluyendo la metodología y las bases de datos open-source utilizadas. La segunda sección es la metodología RPBEE, los modelos, algoritmos e implementación para evaluar el análisis de riesgo sísmico regional. La tercera sección representa los resultados. La cuarta y quinta sección son la discusión y las conclusiones, respectivamente.

2. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal desarrollar un modelo de exposición detallado para edificios residenciales en Santiago de Chile y un análisis del riesgo sísmico regional asociado al escenario sísmico de una repetición del terremoto del Maule del 2010.

2.1. Objetivo General

- OG: Realizar un análisis del riesgo sísmico a nivel regional para edificios residenciales en Santiago de Chile.

2.2. Objetivos Específicos

- OE1: Desarrollar un modelo de exposición para edificios residenciales.
- OE2: Evaluar la distribución espacial de las métricas de riesgo sísmico regional.
- OE3: Estudiar la desagregación de las métricas de riesgo sísmico por comunas, tipologías y eras de diseño.

3. Desarrollo del Modelo de Exposición

Un modelo de exposición completo es indispensable para evaluar el riesgo sísmico de las áreas urbanas. El nivel de información requerido para cada estructura depende de los parámetros de los modelos que se utilizarán (modelos de movimiento del suelo, modelos de vulnerabilidad y modelos de pérdidas) y de las métricas de riesgo específicas a calcular. En términos generales, el modelo requiere información de la estructura, del sitio, del uso de la edificación y características sociales. Entre ellos se incluyen: coordenadas de las estructuras (centroides de las huellas), clasificación funcional (residencial, oficina, comercial, entre otros), altura, número de pisos, tipo de sistema de resistencia de carga lateral (LLRS), número de viviendas y habitantes, año de construcción, norma de diseño sísmico utilizada (era de diseño), propiedades del suelo. Se puede incluir información adicional como el valor económico si está disponible, pero es más difícil de obtener y/o estimar.

Dado que prácticamente todos los edificios residenciales que superan los cinco pisos en Chile están contruidos con muros de hormigón armado (HA) como su LLRS, esta configuración estructural se asumirá para cada edificio en este modelo de exposición. Además, los modelos de vulnerabilidad disponibles solo diferencian en función del número de pisos, por lo que esto no causa un cambio en la sección de resultados. Esta suposición se discutirá más adelante en la sección 6.

Las siguientes subsecciones describen las metodologías utilizadas para desarrollar el modelo de exposición de edificios residenciales en Santiago, Chile. Solo se incluirán edificios de cinco o más pisos. Se analizaron, filtraron y extendieron múltiples bases de datos de código abierto para crear el modelo final. Estos conjuntos de datos vienen por adquisición de datos remotos (de imágenes satelitales) e in situ (censo). El área de estudio está limitada por la extensión de los parámetros de suelo disponibles de Santiago de Bustos et al. (2023).

3.1. Huellas georreferenciadas

Se analizaron múltiples bases de datos de huellas open-source. El primero fue Building Footprints de Microsoft (McFarland et al., 2022), que proporciona una base de datos multicontinental de huellas de estructuras. Contiene 823,506 polígonos dentro de la región de estudio. Este conjunto de datos no tiene cobertura de altura fuera de los Estados Unidos y algunas regiones de Europa. Más recientemente, se lanzó *Google Open Buildings V3 Polygons* (Sirko et al., 2021). Contiene una base de datos global de huellas donde cada polígono tiene un nivel de precisión (i.e., un número indicando un nivel de confianza de que el polígono acierta a una estructura existente). La última base de datos son las huellas de *OpenStreetMap* (OSM) (OpenStreetMap contributors, 2024). OSM es un proyecto colaborativo y editable del mapa de todo el mundo.

Para elegir el conjunto de datos de huellas definitivo, se consideraron cuatro indicadores clave: completitud, precisión, sobredetección y detección errónea. Completitud se refiere a si la base de datos tiene una gran cobertura en la región de estudio. Precisión se refiere a si la huella coincide con la planta del edificio real. Sobredetección se refiere a si para un edificio o estructura dada hay múltiples huellas. Por último, detección errónea se refiere a si detecta otras cosas que no son edificios (como paradas de autobús, árboles, autos, subestructuras sobre los edificios). Como se observa en la Figura 1, el conjunto de datos Google Open Buildings V3 Footprints tiene una alta completitud, incluso con casas y estructuras industriales, pero tiene una baja precisión, alta sobredetección y alta detección errónea. En particular, tiene muchas estructuras pequeñas que pueden agregar ruido al modelo de exposición. Al filtrar por alta precisión, elimina muchos edificios residenciales altos

(que tienen menor nivel de confianza), por lo que perdemos completitud respecto a los edificios que es el punto de interés. Microsoft Building Footprints también contiene alta completitud, pero tiene baja precisión y alta detección errónea. Incluso después de filtrar por un mínimo de $50\text{[m}^2\text{]}$ propuesto por Huang et al. (2021) para filtrar detecciones erróneas, todavía hay sobredetección (más de un polígono por edificio). El conjunto de datos de OSM tiene baja completitud para todas las estructuras, pero alta completitud para edificios de mediana y gran altura. Además, tiene alta precisión y prácticamente cero polígonos son detecciones erróneas. En resumen, la base de datos de OpenStreetMap es la mejor fuente de huellas para este estudio. Adicionalmente, en las Figuras 1d y 1e se compara la precisión de las huellas de Google Open Buildings y OpenStreetMap con el ráster de altura seleccionado en la Sección 3.2.

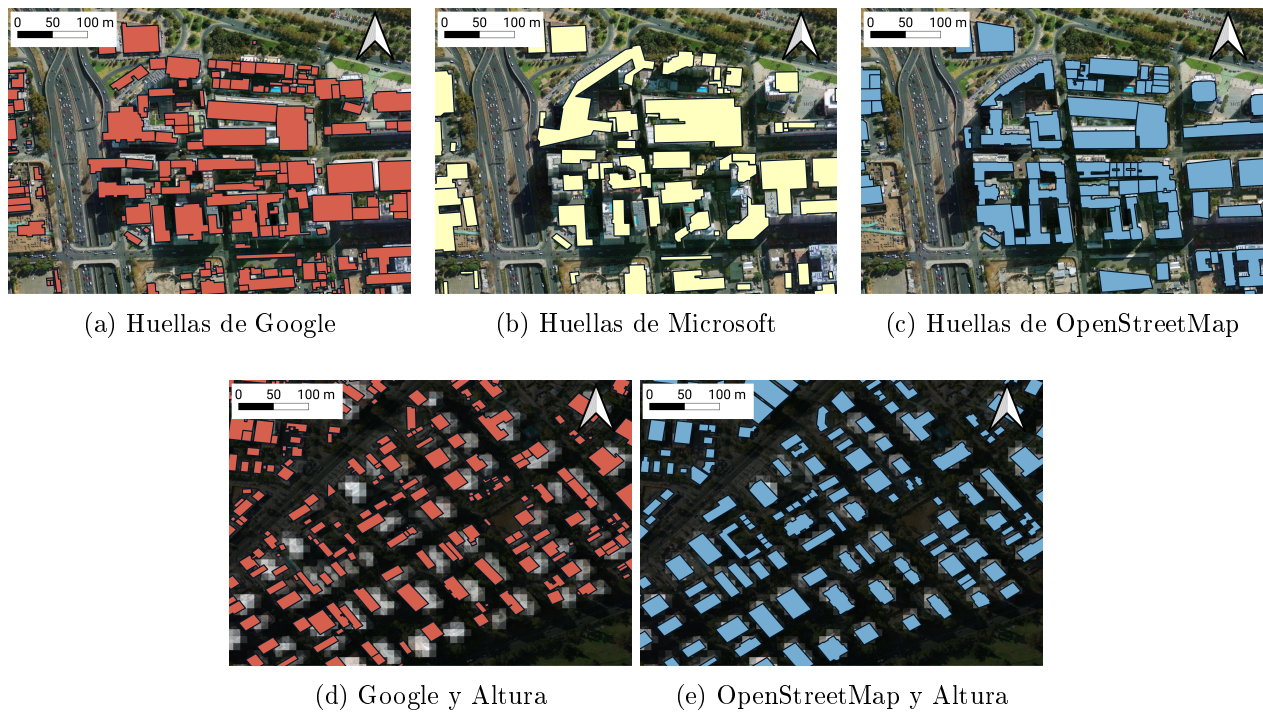


Figura 1: Comparación de la precisión de las bases de datos de (a) Google Open Buildings, (b) Microsoft Footprints y (c) OpenStreetMap, con el mapa en Santiago Centro (Coordenadas: Longitud: -70.65821, Latitud: -33.433414). Comparación de precisión de las bases de datos (c) Google Open Buildings y (d) OpenStreetMap con el ráster de altura (siguiente subsección) en Las Condes (Coordenadas: Longitud: -70.59590, Latitud: -33.40585).

3.2. Altura y número de pisos

Definidas ya las huellas a utilizar, es posible estimar la altura de cada edificio utilizando un ráster de alturas de edificios. Existen múltiples conjuntos de datos de código abierto. Muchos de ellos tienen baja resolución y son buenos para "earth-observation" a gran escala (para ver mapas), pero no para construir modelos de exposición suficientemente detallados para un análisis del riesgo sísmico. Por ejemplo, Copernicus, el componente de Observación de la Tierra del programa espacial de la Unión Europea, desarrolló la *Global Human Settlement Layer* (GHSL) (Pesaresi et al., 2024). Utilizaron imágenes satelitales del conjunto Sentinel para desarrollar múltiples datos que abarcan el globo. Uno de estos conjuntos de datos es el ráster de altura de edificios con una resolución

de 100mx100m para el 2018. Más recientemente, *Google Open Buildings (2.5D Temporal Dataset)* (Sirko et al., 2024) proporcionaron un ráster de alta resolución de alturas de edificios con versiones de 10x10m y 50x50cm para el año 2023. La resolución de 10m es lo suficientemente alta como para predecir con precisión la altura de cada huella de edificio. La resolución de 50cm fue excluída debido a los recursos computacionales y que la alta resolución podría hacer más compleja e incierta la estimación de altura (ver Sección 6). La comparación entre las resoluciones de las bases de datos del GHSL y de Google se muestra en la Figura 2.

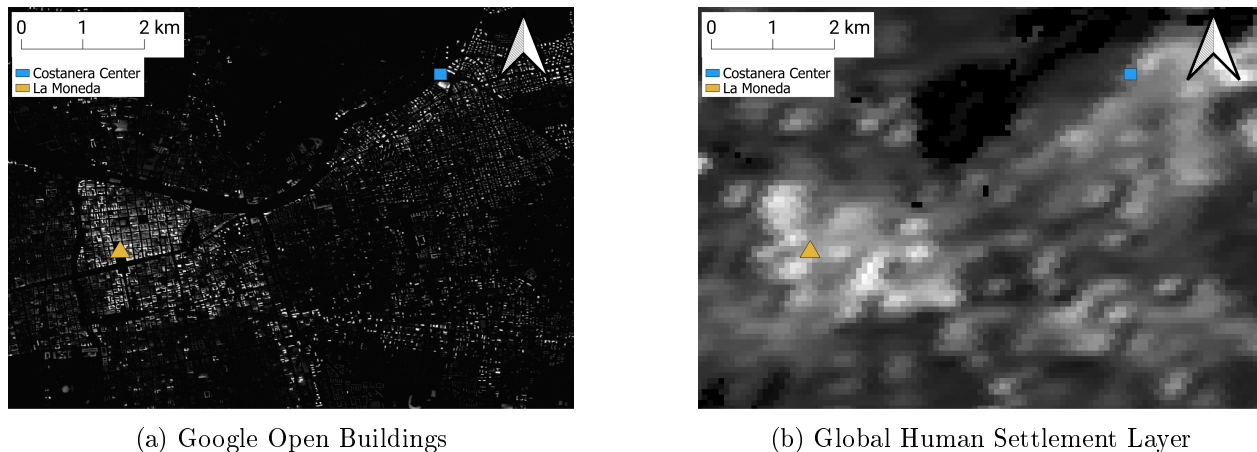


Figura 2: Comparación de la resolución entre los rásteres de altura de (a) Google Open Buildings 10x10m y (b) Global Human Settlement Layer 100x100m a la misma altitud.

Para determinar la altura a cada edificio, se asignó el valor máximo de altura contenido en cada huella. Se evitó el uso del valor medio y mediano, ya que tienden a subestimar la elevación del edificio en casos donde la alineación entre la huella y el ráster de altura no es perfecta. Se prefirió este enfoque para reflejar el punto más alto del edificio mientras se minimiza el sesgo por píxeles de valor más bajo dentro de la huella. Si bien el valor máximo puede sobreestimar la altura en los casos que el edificio posea una subestructura sobre él, se hizo una verificación mediante inspección visual del número de pisos de una muestra de edificios aleatorios usando Google Street View.

La estimación del número de pisos se realizó dividiendo la altura por un factor de 2.9[m] para edificios con menos de 23.2[m] de altura (equivalente a 8 pisos de 2.9[m]) y 3.3[m] para edificios con alturas mayores a 26.4[m] (equivalente a 8 pisos de 3.3[m]). Ambas alturas de piso fueron elegidas en base a una inspección visual en Google Street View. A los edificios con altura entre 23.2[m] y 26.4[m] quedan con 8 pisos.

3.3. Filtrado no residencial

Este modelo de exposición se centra en edificios residenciales. En consecuencia, los edificios no residenciales deben ser excluidos de este estudio. Esto se debe a múltiples consideraciones, pero principalmente porque los edificios de oficinas, comerciales, gubernamentales y de otros tipos son más difíciles de identificar, y tienen una mayor variabilidad en las configuraciones arquitectónicas (y código de diseño), lo que socava la confiabilidad de las curvas de fragilidad precalculadas basadas en arquetipos bien definidos. Por lo tanto, hay que descartar todas las estructuras que no son edificios residenciales.

Para filtrar por su clasificación funcional, hay dos conjuntos de datos disponibles: La primera fuente de información es de GHSL. Pesaresi et al. (2024) crearon las capas ráster de *Morphological Settlement Zone* (MSZ) y *Functional Classification* (FC), ambas con una resolución espacial de 10x10m. El ráster MSZ distingue tres categorías principales —espacio abierto, espacio construido residencial y espacio construido no residencial— divididas en quince tipos de clasificación (e.g., vegetación baja, vegetación alta, altura residencial <3m, altura no residencial >30m, entre otros). Debido a la gran cantidad de tipos de clasificación, identificar si un edificio es residencial o no residencial se vuelve desafiante porque múltiples clasificaciones pueden superponerse en una sola huella, lo que lleva a una posible clasificación errónea. El caso más complejo es cuando una vegetación alta está cerca de un edificio, por lo que la huella podría ser descartada erróneamente como espacio abierto o vegetación alta. Por el contrario, el ráster de FC solo indican si el píxel es residencial o no residencial (Fig. 3). Como la huella de un edificio puede contener ambos valores, se escogió una proporción del 10 % o más de no residencial para filtrar edificios no residenciales. La segunda fuente de información son los polígonos del uso de suelo (land-use) de OpenStreetMap (OpenStreetMap contributors, 2024). Los polígonos tienen descripciones de uso de suelo como cantera, ferrocarril, industrial, entre otros. Usando estas geometrías como base, el conjunto de datos fue extendido con más polígonos y más información manualmente durante meses utilizando el software *QGIS*. Esta base de datos de polígonos con códigos que indican si los edificios eran residenciales, no residenciales, si eran estructuras multifamiliares o unifamiliares, la tipología a la que pertenecen (5-7, 8-12, 13+ pisos) o incluso el número específico de pisos en algunos casos y en algunos se incluyó la era de diseño (solo post-2010). Las tipologías mencionadas en la extensión fueron seleccionadas para coincidir con las curvas de fragilidad desarrolladas por Vásquez y Heresi (2023) y el modelo de Aravena et al. (2021), pero no son las utilizadas en las secciones siguientes. Sin embargo, el modelo de exposición final tiene número de pisos y altura en metros, no descripciones de tipologías para permitir elegir las al analista.

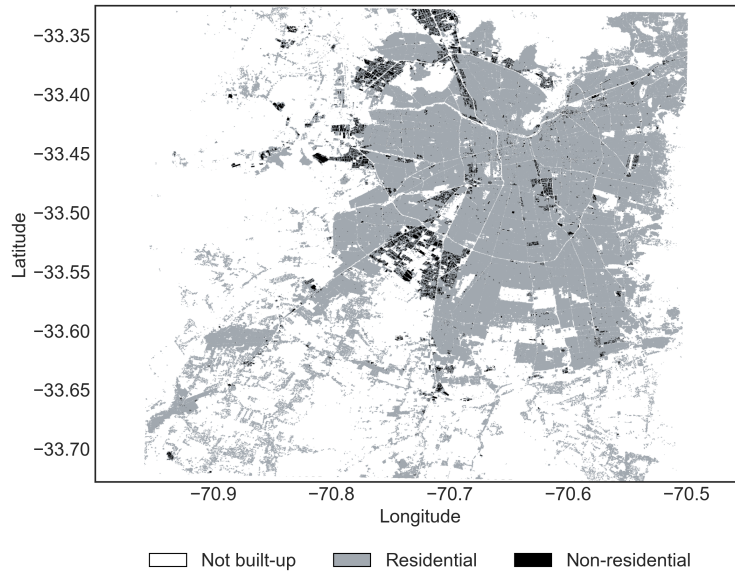


Figura 3: Clasificación funcional de la base de datos del Global Human Settlement Layer.

Finalmente, para filtrar se definió el siguiente algoritmo para eliminar todos los edificios clasificados como no residenciales:

- (1) Filtrar todas las huellas que cumplan con el umbral del ráster de clasificación funcional (FC) del 10 %, excepto aquellas estructuras que el conjunto de datos de geometrías de uso de suelo o la extensión hecha manualmente identifique explícitamente como residenciales.
- (2) Eliminar todas las huellas que el conjunto de datos de geometrías de uso de suelo o la extensión hecha manualmente identifique explícitamente como no residenciales.
- (3) Descartar todas las huellas con cuatro pisos o menos, obteniendo finalmente solo los edificios residenciales de cinco o más pisos con su altura y número de pisos respectivos.

La distribución espacial resultante de las alturas de los edificios residenciales y el número de edificios por número de pisos se ilustran en las Figuras 4b y 4c. La Figura 4a muestra el número de edificios residenciales por comuna en Santiago, Chile.

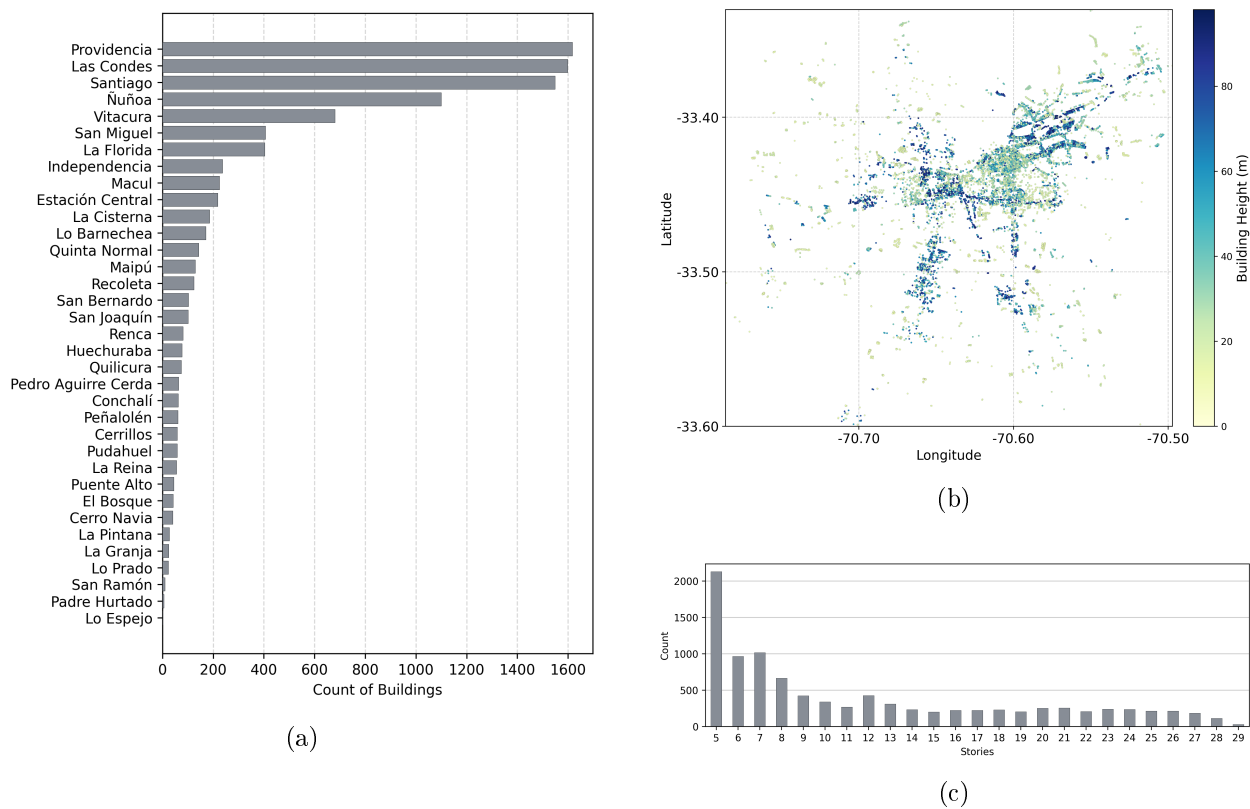


Figura 4: Distribución de edificios residenciales de 5 o más pisos de la base de datos final en Santiago, Chile. (a) Número de edificios residenciales por comuna, (b) Distribución espacial de las alturas de los edificios residenciales, y (c) número de edificios por número de pisos.

En las siguientes secciones, se utilizan las tipologías *low-rise* (entre 5 y 9 pisos), *mid-rise* (entre 10 y 24 pisos) y *high-rise* (25 o más pisos) según la clasificación de Jünemann et al. (2024). En la Figura 5 se muestra la distribución espacial de estas tipologías. Con respecto a la distribución espacial de los edificios, los edificios de gran altura se concentran predominantemente a lo largo de las avenidas principales, mientras que se observa una densidad significativa de edificios de mediana altura en las comunas centrales y orientales. En contraste, los edificios de baja altura exhiben una distribución espacial más uniforme en toda la ciudad.

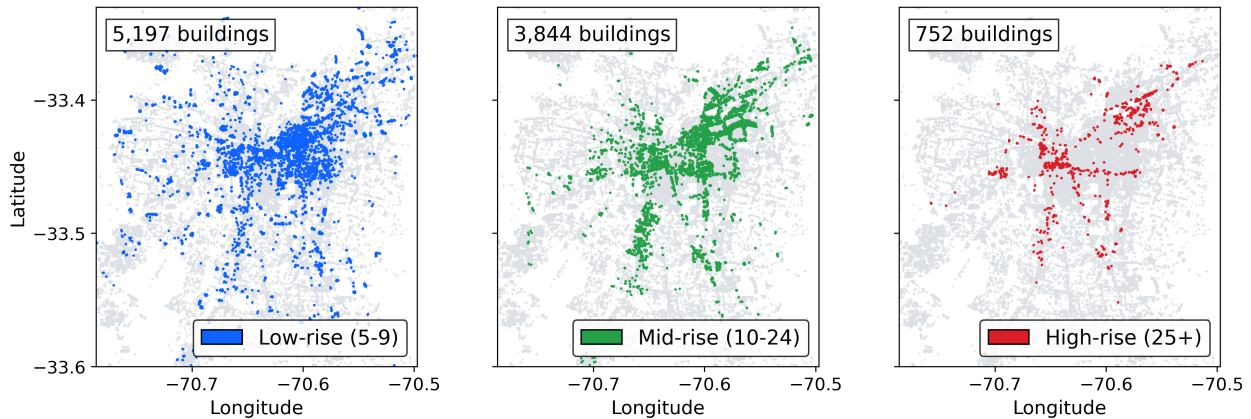


Figura 5: Tipologías basadas en la altura de edificios residenciales en Santiago, Chile, de acuerdo al modelo de exposición desarrollado.

3.4. Datos del censo

El Instituto Nacional de Estadísticas (INE) realiza censos nacionales periódicos para recolectar información demográfica, social y de vivienda. De tales censos, el georreferenciado más reciente disponible actualmente se realizó en 2017 (INE, 2018). En este censo, la resolución espacial más fina dentro de la ciudad es a nivel de *manzana censal*. Cada manzana censal proporciona información sobre el número de habitantes, viviendas, hogares y otras características sociales. Adicionalmente, algunas variables están desagregadas, por ejemplo, el número de viviendas por tipo (e.g., viviendas tipo departamento o tipo casa, si tienen acceso a agua, o materiales de construcción). Durante 2023 se realizó un nuevo censo; sin embargo, los resultados aún no se han publicado en formato georreferenciado. Por otro lado, el censo anterior, realizado en 2012, se consideró defectuoso debido a una mayor proporción de datos faltantes (9.6%) en comparación con censos anteriores (Bravo et al., 2013). Por lo tanto, el Censo 2017 es el censo más reciente y preciso disponible.

3.4.1. Número de Viviendas y Hogares

En el censo, el número de viviendas se desagrega en cinco tipos. Uno de ellos es el tipo departamento. Asumiendo un tamaño de departamento homogéneo dentro de cada manzana, el número de viviendas se puede asignar proporcionalmente al área residencial total de cada edificio (i.e., área de la huella multiplicada por el número de pisos).

Dado que el censo es relativamente antiguo en comparación con las huellas, hay edificios recientes en manzanas donde el censo no mostró ninguna vivienda tipo departamento. Por lo tanto, el número de viviendas por edificio debe tener un mínimo y un máximo. El mínimo se definió como tres por piso, pero el máximo se definió como una función del área mínima de las viviendas construidas en cada comuna a_{min} usando la base de datos georreferenciada de permisos del INE (INE, 2017) (ver Tabla 1). Esta base de datos contiene permisos de los años 2002 a 2023.

Tabla 1: Área mínima estimada de vivienda (en m²) para edificios residenciales de más de cinco pisos, basada en permisos de construcción para cada comuna en Santiago, Chile.

Comuna	a_{min}	Comuna	a_{min}	Comuna	a_{min}
Buín	48.68	La Florida	39.40	Quilicura	49.27
Cerrillos	33.02	La Granja	46.96	Quinta Normal	31.27
Cerro Navia	60.91	La Pintana	55.35	Recoleta	34.54
Colina	59.05	La Reina	70.11	Renca	46.72
Conchalí	43.40	Lampa	43.20	San Bernardo	47.76
El Bosque	47.66	Las Condes	21.74	San Joaquín	46.39
Estación Central	33.50	Lo Barnechea	45.66	San Miguel	20.75
Huechuraba	34.14	Lo Espejo	65.71	San Ramón	58.89
Independencia	31.92	Lo Prado	48.88	Santiago Centro	20.63
La Cisterna	41.88	Macul	32.18	Talagante	62.40
Maipú	40.69	Melipilla	49.06	Vitacura	30.20
Padre Hurtado	51.09	Pedro Aguirre Cerda	52.40	Ñuñoa	32.35
Peñalolén	41.74	Providencia	20.15		
Pudahuel	47.86	Puente Alto	39.93		

Según la metodología del censo del *INE*, existe una distinción entre viviendas y hogares. Una vivienda se refiere a la unidad estructural física, mientras que un hogar denota un grupo de individuos (típicamente una familia) que reside en esa unidad. En consecuencia, no toda vivienda contiene un hogar. Además, un hogar se considera solo si al menos un residente pasó la noche anterior a la encuesta en la vivienda y respondió las preguntas de la encuesta. Desafortunadamente, el censo no tiene la información de hogares desagregada como lo tiene por tipo de vivienda. Sin embargo, es posible estimar el número promedio de hogares por vivienda y, usando esta proporción, estimar el número de hogares en cada edificio.

3.4.2. Número de Habitantes

Cada manzana censal también contiene información sobre el número de habitantes. Esta información tampoco está desagregada por tipo de vivienda. Por lo tanto, para superar esta limitación, se puede estimar el número promedio de habitantes por vivienda en cada manzana dividiendo el total de habitantes en la manzana por el número total de viviendas en la manzana. Este promedio a nivel de manzana se puede aplicar a cada vivienda para estimar el número de habitantes en cada edificio. Por consistencia, se fuerza un mínimo de un habitante por hogar, mientras que se aplica un máximo de siete. El máximo es necesario porque en algunos casos hay manzanas que contienen numerosos edificios de tres pisos y, dado que no se pueden distinguir de las casas en el análisis (debido a la limitada precisión de la altura), el número promedio de habitantes por vivienda sería sobreestimado, por lo tanto, debe ser acotado. El valor máximo se obtuvo de un ajuste de curva de distribución del número promedio de habitantes por hogar (ver histograma en Anexo A). Los resultados para el número de viviendas por cada edificio y el número de habitantes de cada edificio se muestran en la Figura 6.

El área de estudio tiene 706,259 viviendas tipo departamento (33 % del total de viviendas), que contienen 1,627,076 habitantes (25 % del total de habitantes). Esto abarca todos los tipos de tipologías de edificios residenciales, incluyendo de tres y cuatro pisos. El modelo de exposición de este

estudio es únicamente para edificios residenciales de cinco o más pisos. El modelo contiene 501,170 viviendas y 1,054,104 habitantes, lo que es un 70.96 % del total de departamentos y un 64.79 % del total de habitantes viviendo en departamentos.

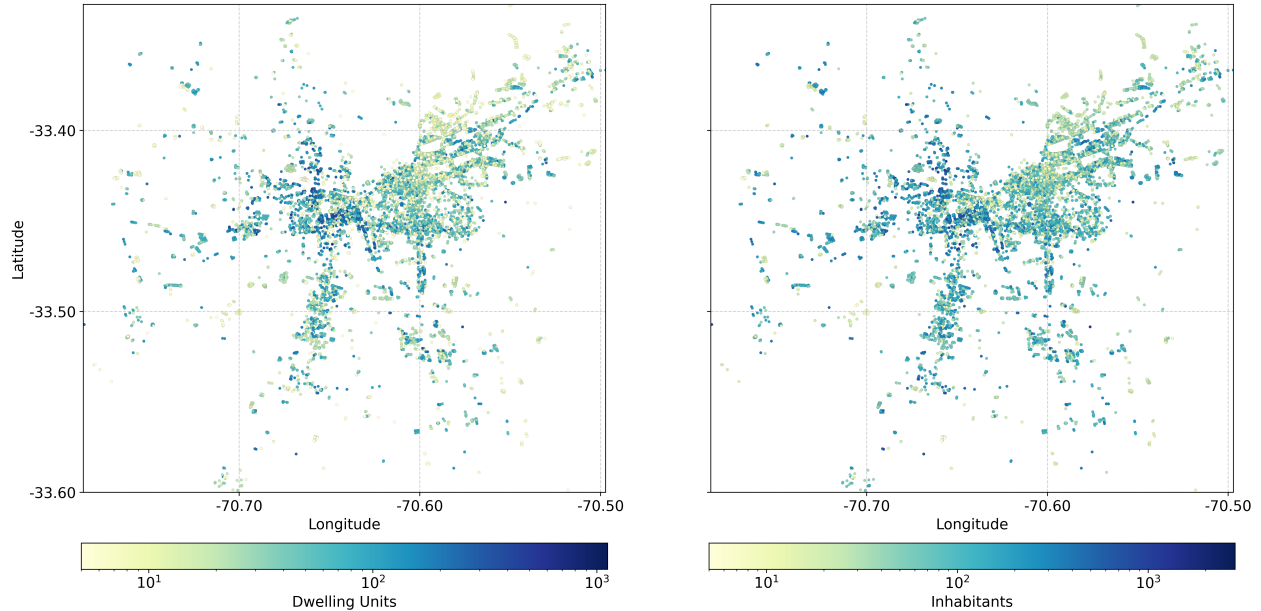


Figura 6: Número estimado de viviendas y habitantes en edificios residenciales en Santiago, Chile, de acuerdo al modelo de exposición desarrollado.

3.5. Año de Construcción y Era de Diseño

Determinar el año de construcción de cada edificio es crucial, ya que varios factores dependientes del tiempo afectan la vulnerabilidad estructural. Por ejemplo, el envejecimiento deteriora las propiedades mecánicas de los materiales, aumentando así la vulnerabilidad (Michelini et al., 2023). Asimismo, las secuencias de terremotos pueden acumular daño, por lo que, en caso de que los edificios no sean reparados, facilita estados de daño más severos en un futuro terremoto o en réplicas (Hulsey et al., 2024). Además, la vulnerabilidad esperada de un edificio está significativamente influenciada por la norma de diseño sísmico, que se actualiza periódicamente. La norma de diseño sísmico chilena para edificios residenciales tuvo un cambio importante después del terremoto de 2010 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2011). Dada la modificación de parámetros y objetivos de diseño, edificios arquitectónicamente similares tienen una vulnerabilidad distinta en función de su era de diseño. Por lo tanto, los edificios se clasifican en dos eras de diseño: pre-2010 y post-2010.

Para estimar el año de construcción de los edificios, se emplearon cuatro metodologías. Las bases de datos utilizadas fueron el World Settlement Footprint 2015 del Centro de Observación de la Tierra del Centro Aeroespacial Alemán (Marconcini et al., 2020), que abarca 1985-2015 (valor 1985 significa 1985 o más antiguo) y tiene una resolución de 30x30m; el Google Open Buildings 2.5D temporal dataset (Sirko et al., 2024), que abarca 2016-2023 y tiene una resolución de 10x10m; y las geometrías de uso de suelo extendidas. Los métodos son los siguientes:

- Promedio de *WSF2015*: El año de construcción es estimado promediando proporcionalmente los valores del ráster dentro de cada huella según su participación de área.

- Intersección con *WSF2015*: Para mitigar el sesgo potencial que surge de la proximidad a edificios más antiguos en el método anterior, se identifica a un edificio como "2010 o posterior" si alguna parte de su huella interseca el ráster filtrado con años posteriores a 2010.
- Variación temporal de la altura: Utilizando los rasters por año de Google, se considera que los edificios se construyeron en un año determinado si su altura en ese año era el 10 % de la altura registrada en 2023 (el año base). Esto dado que indicaría un desarrollo vertical sustancial correspondiente a actividad constructiva.
- Correcciones manuales: Usando las geometrías definidas manualmente que distinguen las estructuras post-2010 (dado que las imágenes más antiguas disponibles en street-view son de 2012 o más recientes), se refina aún más las eras de diseño. Este método solo permite corregir clasificaciones erróneas en la era de diseño (no en el año de construcción), por lo que a cada edificio corregido de pre-2010 a post-2010 se le asignó el año 2010.

La era de diseño de cada edificio se definió y corrigió conjuntamente en función de su año de construcción estimado. Los edificios se categorizaron en dos eras de diseño: pre-2010 y post-2010, reflejando los cambios en las normas de construcción después del terremoto de 2010. La distribución espacial del año de construcción y el histograma del año de construcción de los edificios residenciales se muestran en la Figura 7. En el modelo, 7,825 (79.9 %) se construyeron antes del 2010, mientras que 1,968 (20.1 %) después. El número de edificios y viviendas desagregados por tipología (basada en altura) y era de diseño se muestran en la Figura 8. Aunque el número de edificios de baja altura es sustancialmente mayor que el de edificios de gran altura, el número de unidades de vivienda contenidas en edificios de gran altura es comparable al de los de baja altura. La mayoría de las unidades de vivienda se encuentran en edificios de mediana altura dado al amplio rango de número de pisos que abarca esa tipología.

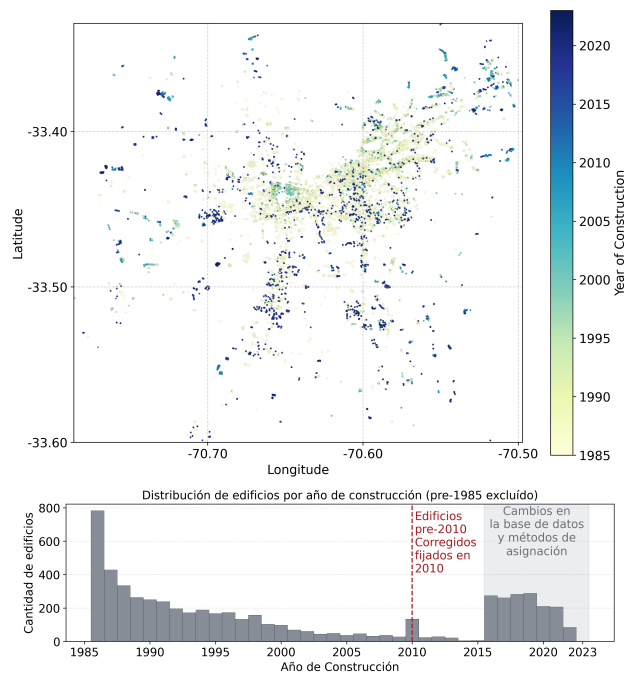


Figura 7: Distribución espacial e histograma del año de construcción de edificios residenciales en Santiago, Chile, de acuerdo al modelo de exposición.

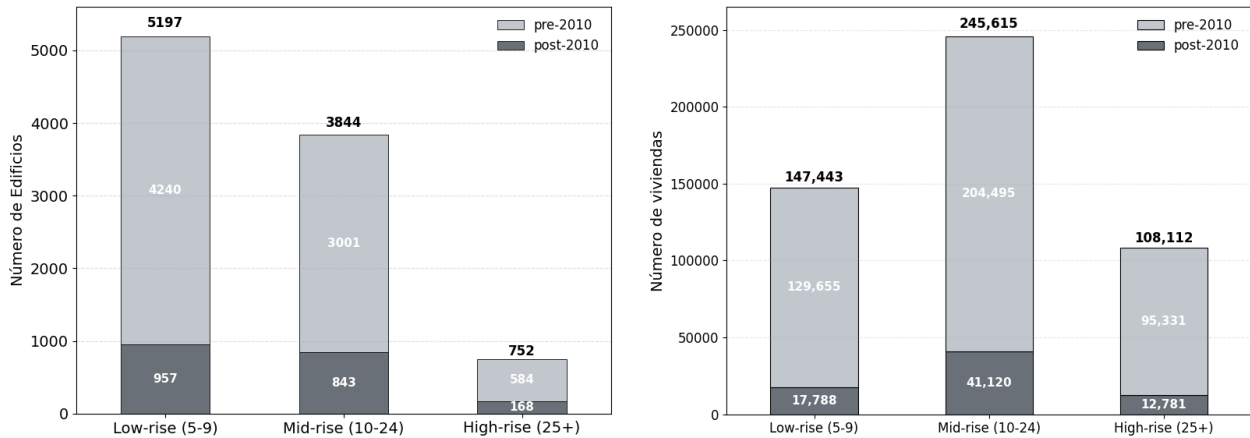


Figura 8: Número de edificios y viviendas por tipología y era de diseño en Santiago, Chile.

3.6. Parámetros del sitio

Los suelos pueden amplificar el movimiento sísmico durante un terremoto. Los modelos de movimiento del suelo (GMMs) consideran algunos parámetros relevantes del suelo para incorporar los efectos de sitio. El modelo más reciente de características geotécnicas para Santiago fue propuesto por Bustos et al. (2023), quienes hicieron una microzonificación de la velocidad de corte del suelo en los primeros 30 metros V_{s30} y el período del suelo T_g . Por lo tanto, estos dos parámetros se incluyen en el modelo de exposición interpolando los valores del ráster a cada centroide de la huella del edificio.

4. Análisis del Riesgo Sísmico a Nivel Regional

Como caso de estudio, esta sección presenta una evaluación probabilística de métricas de riesgo sísmico regional relevantes para la ciudad de Santiago y sus comunas bajo un escenario sísmico definido. Se analizan cuatro métricas: el número de edificios colapsados y el número de viviendas perdidas debido al colapso (notar que no son todas las viviendas perdidas, solo las debidas a colapso). Además, se utilizarán métricas porcentuales de las mismas variables, es decir, fracción de edificios colapsados y fracción de viviendas perdidas debido al colapso.

Al evaluar las métricas de riesgo sísmico regional, es imperativo tener en cuenta las incertidumbres inherentes que deben incorporarse y propagarse en el análisis. Se utilizará el marco de *Ingeniería Sísmica Basada en el Desempeño a Nivel Regional* (RPBEE) (Heresi & Miranda, 2023b) —que constituye una extensión del marco de *Ingeniería Sísmica Basada en el Desempeño* (PBEE) (Moehle & Deierlein, 2004; PEER, 2004)— para estructuras espacialmente distribuidas. A través de este marco, es posible calcular *Variables de Decisión Regionales* (RDV), que son las métricas de riesgo regional en cuestión.

4.1. Amenaza

4.1.1. Contexto Sísmico

La subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana es la fuente principal de la actividad sísmica de Chile. Tiene el potencial de crear megaterremotos mayores a M_w 8.0 con una recurrencia relativamente alta —8 eventos en los últimos 70 años— (Ruiz & Madariaga, 2018). El megaterremoto más reciente que ha afectado a Chile es el terremoto del Maule de M_w 8.8 en 2010. El epicentro de la ruptura se ubicó en las coordenadas $(-35.909, -72.733)$, con una profundidad de aproximadamente 35 [km]. La repetición de este escenario sísmico se utilizará para el análisis. El modelo de la ruptura está disponible en la base de datos del *United States Geological Survey* (USGS) (Hayes et al., 2017). Si bien este modelo proporciona una representación simplificada de la geometría (planos), su precisión se mejora al proyectar la ruptura sobre la geometría de la zona de subducción *Slab2* propuesta por Hayes et al. (2018), que es el modelo geométrico más actualizado disponible.

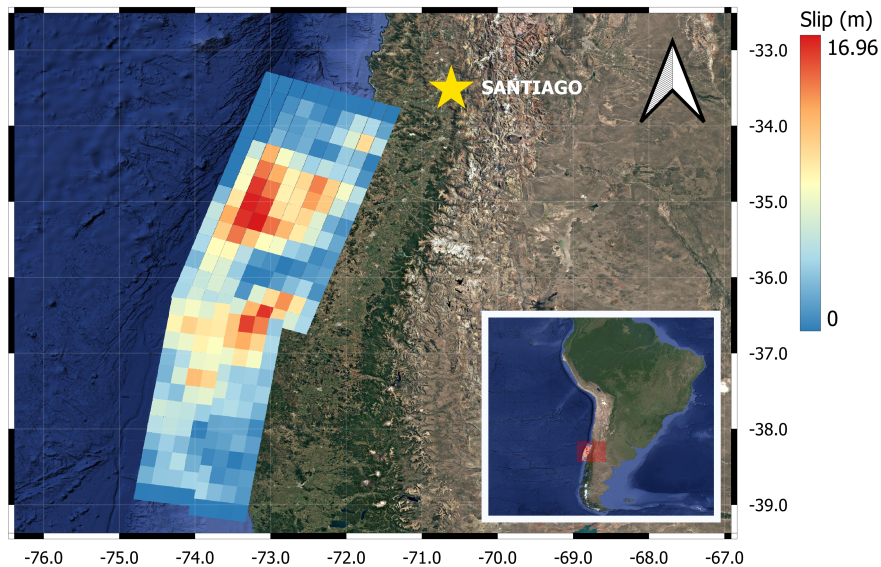


Figura 9: Modelo de ruptura del terremoto del Maule M_w 8.8 de 2010 del USGS y ubicación de Santiago.

4.1.2. Modelos de Movimiento del Suelo

Para simular las Medidas de Intensidad (IMs) en múltiples sitios, se requieren Modelos de Movimiento del Suelo (GMMs). Los GMMs seleccionados para este estudio son los propuestos por Idini et al. (2017), Montalva et al. (2017), Abrahamson y Gulerce (2022), Parker et al. (2022), Kuehn et al. (2020). Los dos primeros modelos están calibrados específicamente para Chile, y los últimos tres modelos son modelos multi-regionales que abarcan el segmento sur de América del Sur (Subducción Nazca-Sudamericana). Estos modelos son combinados utilizando un árbol lógico con igual peso para cada rama con el fin de tener en cuenta la incertidumbre epistémica en la etapa de amenaza. Las IMs a simular son $Sa(1.0s)$ y PGA ya que son las IMs utilizadas en las curvas de fragilidad seleccionadas (ver Sección 4.2).

4.1.3. Correlación Espacial de las Medidas de Intensidad

Dado que los campos de IMs se simulan a través de numerosas ubicaciones, se espera que los sitios vecinos exhiban valores similares. Por lo tanto, se requiere un modelo de correlación espacial de medidas de intensidad. En este estudio se utiliza el modelo propuesto por Aldea et al. (2022), cuyo modelo de correlación es para los residuos intra-evento de pseudo-aceleraciones espectrales y que depende de la distancia euclidiana entre los sitios y el período de vibración considerado. Propusieron la siguiente ecuación.

$$\rho_w(\Delta, T) = \exp \left[- \left(\frac{\Delta}{\beta(T)} \right)^{\alpha(T)} \right] \quad (1)$$

Donde Δ (km) es la distancia entre sitios, y para un $T = 1.0$ [s], $\beta(T) = 12.5$ [km], mientras que para PGA ($T = 0.0$ [s]), $\beta(T) = 14.4$ [km]. El exponente $\alpha(T) = 0.59$ para todos los períodos.

4.1.4. Correlación entre Medidas de Intensidad

Dado que el cálculo de los estados de daño requiere el uso de múltiples IMs (PGA y $Sa(1.0s)$ en este estudio), se necesita una correlación entre las IMs. En este sentido, Candia et al. (2020) propusieron coeficientes de correlación entre pseudo-aceleraciones espectrales de diferentes períodos para Chile. Entre PGA y $Sa(1.0s)$, la correlación del residuo inter-evento es de 0.55 mientras que para el residuo intra-evento es de 0.40.

4.2. Vulnerabilidad

La etapa de *Vulnerabilidad* se refiere a la estimación de la susceptibilidad de un edificio a experimentar un estado de daño dada una medida de intensidad demandada. Se representa comunmente mediante curvas de fragilidad, que son la probabilidad de exceder un estado de daño condicionada a la medida de intensidad demandada. Dado un modelo de vulnerabilidad, es posible simular probabilísticamente el estado de daño (colapsado, severamente dañado, etc.) de cada edificio dada la IM en su ubicación. En este estudio, solo se utilizará el colapso como posible estado de daño dada su alta influencia en las variables de decisión regionales de interés.

4.2.1. Selección de Curvas de Fragilidad

En el contexto chileno, múltiples curvas de fragilidad para diferentes tipologías de edificios están disponibles en la literatura. Estas generalmente se representan mediante edificios arquetipo que abarcan grupos específicos de tipologías y atributos. Por ejemplo, Villar-Vega et al. (2017) desarrollaron curvas de fragilidad para un gran conjunto de tipologías de edificios sudamericanos, incluyendo edificios residenciales de hormigón armado de 5 a 10 pisos. Su modelo generaliza edificios para una gran región andina (Chile, Perú, Argentina, entre otros) descuidando las características específicas de edificios locales y la sismicidad local, por lo tanto, disminuyendo su idoneidad para evaluaciones de riesgo localizadas. Más recientemente, Jünemann et al. (2024) elaboraron curvas de fragilidad para edificios de baja (4 a 9 pisos), mediana (10 a 24 pisos) y gran altura (25 o más pisos), correspondientes a las tipologías presentadas anteriormente en la Figura 5. Adicionalmente, estas curvas también están desagregadas por media ductilidad (pre-2010) y alta ductilidad (post-2010), reflejando la introducción de diseño dúctil más rigurosas en las normas de diseño después del terremoto de 2010. Dado que estas curvas de fragilidad son consistentes tanto con las tipologías residenciales chilenas como con los registros sísmicos locales, se mejora su confiabilidad para su uso en riesgo sísmico

regional "local". Por lo tanto, las últimas curvas fueron seleccionadas para el presente análisis y se ilustran en la Figura 10 y Tabla 2.

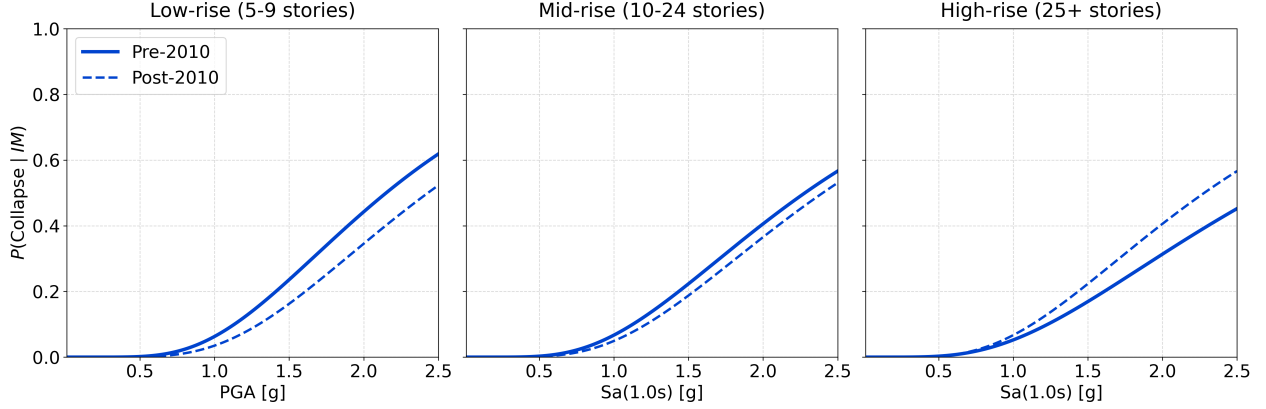


Figura 10: Curvas de fragilidad para arquetipos de edificios residenciales de baja, mediana y gran altura en Santiago, Chile, de Jünemann et al. (2024).

Tabla 2: Mediana y desviación estándar logarítmica de las curvas de fragilidad para arquetipos de edificios residenciales de baja, mediana y gran altura en Santiago, Chile, de Jünemann et al. (2024).

Tipología	IM_c	Pre-2010		Post-2010	
		$\exp(\mu_{\ln(IM_c)})$ [g]	$\beta_{\ln(IM_c)}$	$\exp(\mu_{\ln(IM_c)})$ [g]	$\beta_{\ln(IM_c)}$
Low-rise	PGA	2.15	0.50	2.43	0.49
Mid-rise	$S_a(1.0s)$	2.28	0.55	2.40	0.53
High-rise	$S_a(1.0s)$	2.69	0.61	2.28	0.55

4.2.2. Enfoque de Capacidades Estructurales

En lugar de simular un estado de daño utilizando el enfoque estándar de Bernoulli —que implica la generación de un número aleatorio entre 0 y 1 para determinar el estado de daño—, se simula la capacidad del estado de daño IM_c para cada edificio (Heresi & Miranda, 2022). Esta capacidad representa el umbral de la medida de intensidad que el edificio puede soportar antes de incurrir en el estado de daño especificado. En consecuencia, si la IM demandada, IM_d , es mayor que la capacidad de colapso ($IM_d > IM_c$), el edificio colapsa. La capacidad de colapso IM_c se modela utilizando una distribución lognormal con sus parámetros derivados de las curvas de fragilidad.

4.2.3. Correlación de Daño Estructura a Estructura

Si un edificio colapsa en una simulación, se espera que los edificios vecinos tengan un estado de daño similar. Por lo tanto, se debe incorporar una correlación de daño estructura a estructura. Aranís et al. (2023) desarrollaron un modelo de correlación de capacidades de colapso en función de la distancia de las estructuras. El modelo de correlación propuesto es el siguiente:

$$\rho_c(\Delta) = c + (d - c) \cdot \exp\left(-\left(\frac{\Delta}{b}\right)^a\right) \quad (2)$$

Donde a , b , c , d son coeficientes que dependen de la categorización del grupo estructural. Estas categorías se definen en función del nivel asumido de correlación entre los parámetros del modelo estructural. Las categorías son *idénticas*, *correlacionadas* e *independientes* que representan correlación alta, media y baja respectivamente. En este caso, se seleccionó el grupo independiente, ya que es la más apropiada para el inventario dado que el modelo de exposición contiene edificios variados. Los valores de los coeficientes para este grupo se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Coeficientes del modelo de correlación de capacidades para las estructuras independientes.

Periodo	a	b	c	d
1.0	0.24	40.10	-0.20	0.46

Es importante notar que esta correlación solo está disponible para capacidades que usan $Sa(1.0s)$ y no en $PGA = Sa(0.0s)$. Sin embargo, dado que es irrealista no considerar correlación espacial de capacidades, se utilizó la misma correlación para ambas IMcs.

4.3. Evaluación de Pérdidas

4.3.1. Variables de Decisión

Una Variable de Decisión (DV) se refiere a una medida cuantitativa de *pérdida* utilizada para evaluar el desempeño sísmico de edificios individuales. Estas variables son críticas para predecir pérdidas potenciales e impactos sociales al evaluar el desempeño de un edificio durante terremotos. Los DVs comunes del PEER incluyen pérdidas económicas (e.g., costos de reparación), tiempo de inactividad y víctimas fatales. A escala regional, interesan DVs adicionales tales como: el estado de colapso, el número de viviendas perdidas en el edificio, o el número de personas/familias desplazadas. Dado que en este estudio se están desarrollando métricas de riesgo sísmico regional específicas, se seleccionan como DVs para este estudio el estado de colapso y el número de viviendas perdidas.

Dada la metodología utilizada, el cálculo de las DVs solo depende del estado de colapso que es binario (en la simulación). Como el colapso es simultáneamente un estado de daño global y una DV, a un edificio evaluado con este estado de daño se le asigna, correspondientemente, el colapso como su DV. En el caso del número de viviendas perdidas en el edificio, se asumirá que la totalidad de las viviendas en el edificio se perderán en caso de colapso.

4.3.2. Variables de Decisión Regionales

Una variable de decisión regional (RDV) es la medida cuantitativa de una pérdida en una región de estudio. Es una agregación de las DVs de las estructuras distribuidas espacialmente dentro de la región. Ejemplos de RDVs incluyen el número total de edificios colapsados en una ciudad, el número total de viviendas perdidas, el número total de personas o familias desplazadas, las pérdidas económicas totales y las fatalidades totales. Además, también se puede calcular la fracción de las métricas, por ejemplo, la fracción de edificios colapsados dentro del área de estudio o la fracción de viviendas perdidas. Las fracciones (porcentajes) son una mejor métrica para la comparación de

riesgos entre regiones o entre subregiones de una región en estudio, dado que no todas las regiones tienen el mismo número de edificios y sería inconsistente comparar solo la totalidad.

Para calcular el número de edificios colapsados en la región, simplemente se suma la cantidad de edificios colapsados (1 si el edificio colapsa y 0 si el edificio no colapsa). El número de viviendas perdidas en la región es la suma de las viviendas perdidas debido al colapso en cada edificio. Las fracciones se calculan dividiendo los totales por el número total de edificios y viviendas en la región, respectivamente. Para otras RDVs como el número de personas desplazadas, fatalidades y heridos, se necesitan más supuestos, así como otros estados de daño que no se consideran en este estudio. Por ejemplo, el daño severo también produce personas desplazadas. Nuevamente, se requiere consistencia con los datos locales para hacer estimaciones de métricas de riesgo confiables.

En este estudio, las RDVs que se presentarán serán el número total de edificios colapsados N_c , el número total de viviendas perdidas debido al colapso N_d , la fracción de edificios colapsados R_c , y la fracción de viviendas perdidas R_d . Las RDVs se presentan como una probabilidad de excedencia para totales y fracciones, es decir, la función de distribución acumulada complementaria (CCDF). Por ejemplo, el número de edificios colapsados $P(N_c > n_c | \text{escenario})$. Adicionalmente, los valores esperados de las RDVs se presentan en mapas para observar la distribución espacial y desagregaciones por comunas, tipologías y era de diseño.

4.4. Simulación de Monte Carlo

Para estimar la probabilidad de excedencia de la RDV dado el escenario sísmico, se utiliza el método de Monte Carlo con un total de 10,000 simulaciones. Cada simulación comprende tres pasos secuenciales. Primero, se genera una muestra aleatoria de las medidas de intensidad espacialmente correlacionadas y las capacidades de colapso. Segundo, se determinan los estados de colapso de cada edificio comparando su demanda sísmica (IM_d) y su capacidad (IM_c). Finalmente, las RDVs se calculan agregando las contribuciones individuales de los edificios como fue mencionado anteriormente.

4.4.1. Muestreo de medidas de intensidad

Se genera un vector aleatorio espacialmente correlacionado $\{IM\}$ (con PGA y $Sa(1.0s)$) asumiendo que su logaritmo natural sigue una distribución normal multivariada: $\{\ln(IM)\} \sim N_{mv}(\{\mu_{\ln(IM)}\}, [\Sigma])$. En consecuencia, el vector del logaritmo de las IMs se muestrea usando la siguiente ecuación con parámetros derivados de los GMMs seleccionados y los modelos de correlación:

$$\{\ln(IM)\} = \{\mu_{\ln(IM)}\} + \{dB\} + \{dW\} \quad (3)$$

Donde, $\{\mu_{\ln(IM)}\}$ es el vector de la media del logaritmo natural de las IMs en el sitio de cada edificio, $\{dB\}$ representa el vector de residuos inter-evento; estos están correlacionados entre diferentes IMs, pero tienen el mismo valor en todos los sitios para una IM dada. Mientras que $\{dW\}$ es el vector del residuo intra-evento espacialmente correlacionado que varía entre diferentes sitios e IMs. Ambos residuos son normales multivariados de media cero, distribuidos como:

$$\{dB\} \sim N_{mv}(\{0\}, [\Sigma_{dB}]) \quad (4)$$

$$\{dW\} \sim N_{mv}(\{0\}, [\Sigma_{dW}]) \quad (5)$$

Las matrices de covarianza $[\Sigma_{dB}]$ y $[\Sigma_{dW}]$ se derivan de sus desviaciones estándar $\{\tau\}$ y $\{\phi\}$ respectivamente y sus correlaciones (inter-evento con correlación de IM, mientras que intra-evento con correlación espacial y de IM).

Dentro de cada simulación, se muestra una GMM aleatoria usando un árbol lógico equiprobable. Cada GMM proporciona los vectores $\{\mu_{ln(IM)}\}$, $\{\tau\}$ y $\{\phi\}$ para cada IM en cada sitio. La Figura 11 ilustra las medianas tanto para PGA como para $Sa(1.0s)$ de las 10,000 simulaciones.

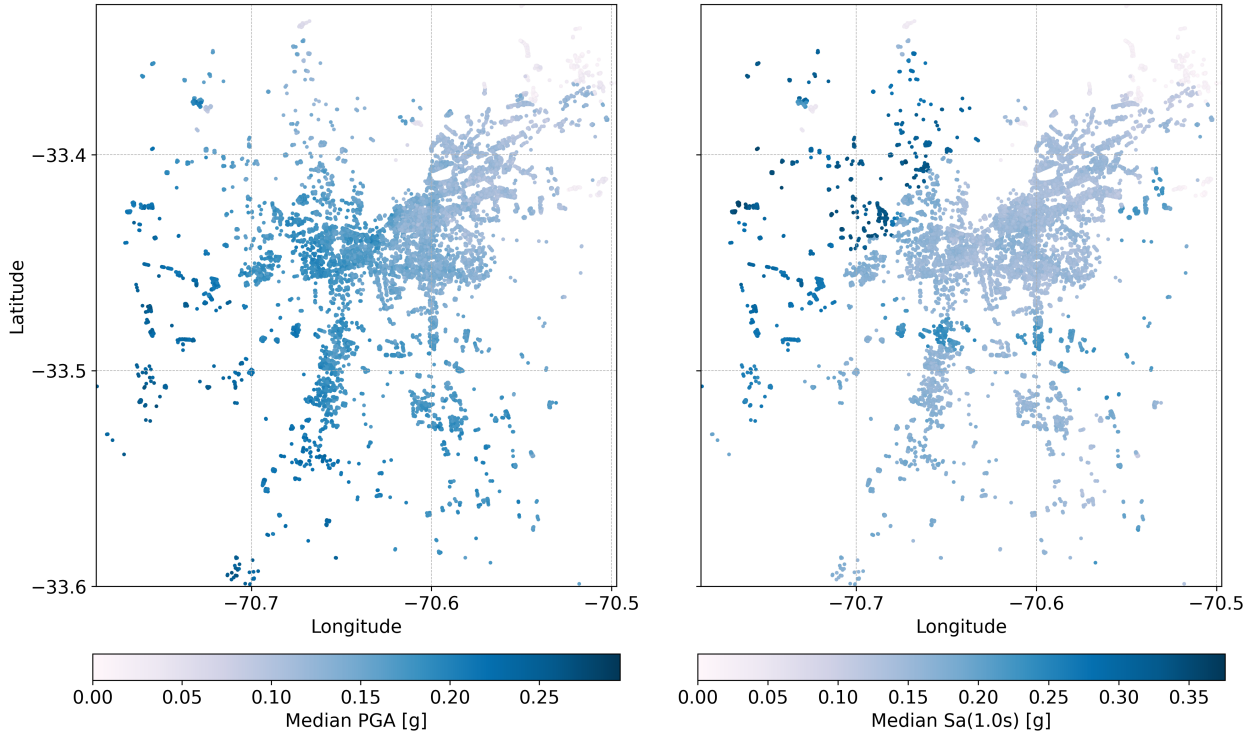


Figura 11: Mediana de las medidas de intensidad simuladas (PGA y Sa(1.0s)) en las ubicaciones de los edificios del modelo de exposición en Santiago, Chile, para el escenario de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8.

4.4.2. Muestreo de Capacidades

Se genera una realización espacialmente correlacionada de $\{IM_c\}$ usando la distribución normal multivariada de sus logaritmos naturales: $\{\ln(IM_c)\} \sim N_{mv}(\{\mu_{ln(IM_c)}\}, [\Sigma_C])$. En consecuencia, el vector de logaritmo de las capacidades de colapso se muestra usando la siguiente ecuación:

$$\{\ln(IM_C)\} = \{\mu_{ln(IM_C)}\} + \{dC\} \quad (6)$$

Donde el término $\{\mu_{ln(IM_C)}\}$ es el vector de la media del logaritmo natural de las capacidades de colapso en cada edificio. El término $\{dC\}$ es el vector de los residuos espacialmente correlacionados de las capacidades de colapso, que varían entre diferentes sitios. Este residuo se modela como una distribución normal multivariada de media cero:

$$\{dC\} \sim N_{mv}(\{0\}, [\Sigma_C]) \quad (7)$$

Donde la matriz de covarianza $[\Sigma_C]$ se deriva de la desviación estándar $\{\beta_{ln(IM_c)}\}$ de las capacidades de colapso y de la correlación de daño estructura a estructura. Tanto las medias $\{\mu_{ln(IM_c)}\}$ como las desviaciones estándar $\{\beta_{ln(IM_c)}\}$ se obtienen de las curvas de fragilidad. Las medianas de las capacidades de colapso tanto para PGA como para $Sa(1.0s)$ de las simulaciones se ilustran en la Figura 12.

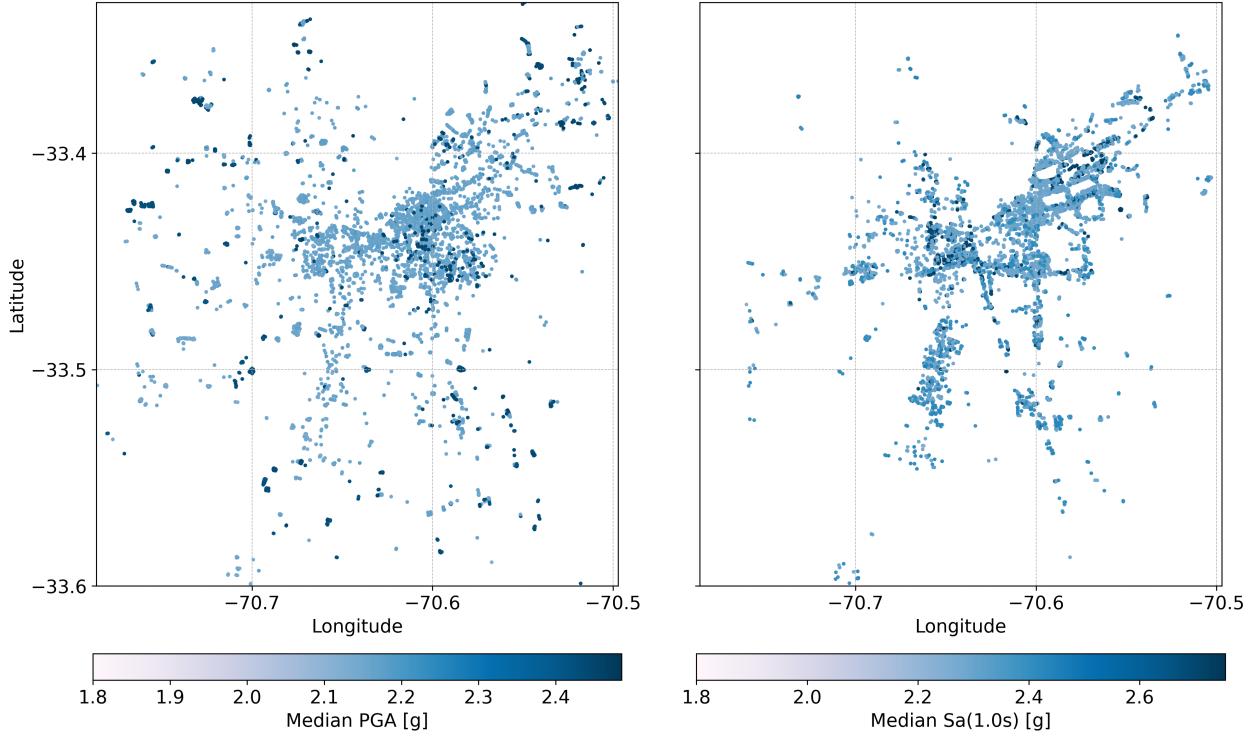


Figura 12: Mediana de las capacidades de colapso simuladas (PGA y Sa(1.0s)) en los edificios del modelo de exposición en Santiago, Chile

4.4.3. Variable de Decisión y Variable de Decisión Regional

Comparando las medidas de intensidad demandadas $IM_{d,i}$ y para las capacidades de colapso $IM_{c,i}$ para cada edificio i , es posible determinar si el edificio colapsa o no en esa simulación comparando ambos valores. La variable de decisión de colapso $DV_{c,i}$ del i -ésimo edificio se define como:

$$DV_{c,i} = \begin{cases} 1 & \text{si } IM_{d,i} > IM_{c,i} \\ 0 & \text{si } IM_{d,i} \leq IM_{c,i} \end{cases} \quad (8)$$

El número de viviendas perdidas $DV_{d,i}$ se calcula multiplicando el número de viviendas $Dwellings_i$ en el edificio por $DV_{c,i}$:

$$DV_{d,i} = Dwellings_i \cdot DV_{c,i} \quad (9)$$

El número de edificios colapsados, N_c , se computa como la suma de $DV_{c,i}$ para todos los edificios y el total de viviendas perdidas, N_d , como la suma de $DV_{d,i}$. La fracción se obtiene dividiendo los totales por el número total de edificios (9,793) y el número total de viviendas (501,170), respectivamente.

$$N_c = \sum_{i=1}^{N_{\text{buildings}}} DV_{c,i} \Rightarrow R_c = \frac{N_c}{N_{\text{buildings}}} \quad (10)$$

$$N_d = \sum_{i=1}^{N_{\text{buildings}}} DV_{d,i} \Rightarrow R_d = \frac{N_d}{N_{\text{dwellings}}} \quad (11)$$

5. Resultados

Utilizando el método Monte Carlo con 10,000 simulaciones para el escenario sísmico de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8 del 2010 impactando el actual inventario de edificios (todo el modelo de exposición desarrollado en este estudio), se calcula la probabilidad de excedencia para las variables de decisión regionales de interés propuestas. Los resultados son los siguientes:

5.1. Regional

5.1.1. Edificios Colapsados

Los resultados del número de edificios colapsados para el escenario de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8, aplicado a la totalidad del modelo de exposición de este estudio, se presentan en la Figura 13.

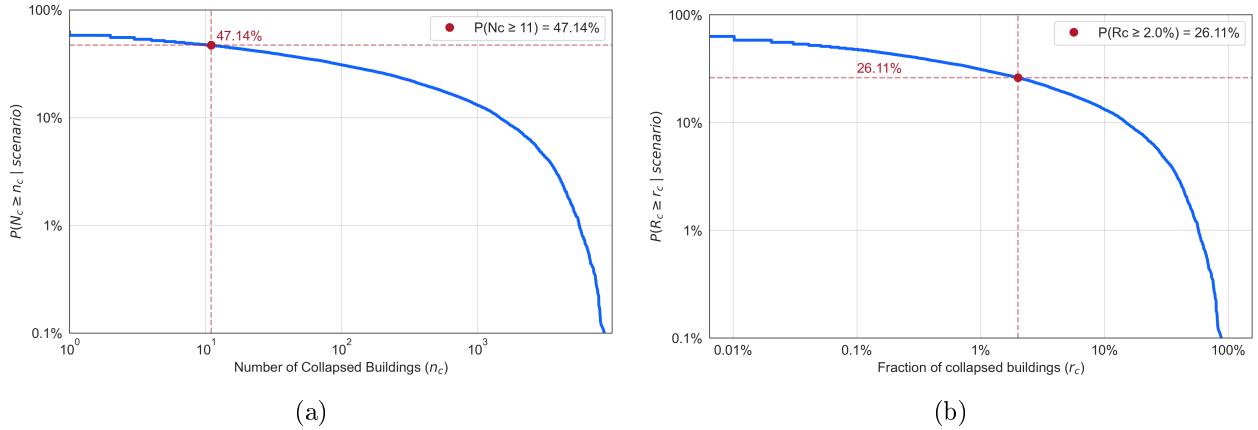


Figura 13: Curvas de probabilidad de excedencia de (a) el número de edificios colapsados y (b) la fracción de edificios colapsados, ambos para el escenario de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8.

Las simulaciones muestran una mediana de 6 edificios colapsados en el área de estudio, lo cual representa un 0.06 % del inventario. La media es de 448 edificios, representando el 4.57 %.

El terremoto de 2010 resultó en el colapso (total o parcial) de 11 edificios en Santiago (Jünemann et al., 2015). De ocurrir este terremoto en la actualidad, como se observa en los resultados, la probabilidad de exceder este número es del 47.14 %. Además, cabe destacar que la mediana es inferior al número reportado de edificios colapsados durante el 2010. Considerando que el inventario actual es

mayor que el existente en 2010, esta cifra representa una proporción de edificios considerablemente menor.

A nivel nacional, el porcentaje de estructuras que excedían los nueve pisos que experimentaron colapso (total o parcial) durante el terremoto de 2010 fue del 2% (Wallace et al., 2012). La probabilidad de exceder este porcentaje en Santiago es del 26.11%. Por lo tanto, hoy es más probable experimentar una fracción de edificios colapsados en Santiago inferior al promedio nacional observado durante el terremoto de 2010.

5.1.2. Viviendas Perdidas

Sobre el número de viviendas perdidas atribuibles exclusivamente al colapso, las curvas de probabilidad de excedencia del total y de la fracción se muestran en la Figura 14.

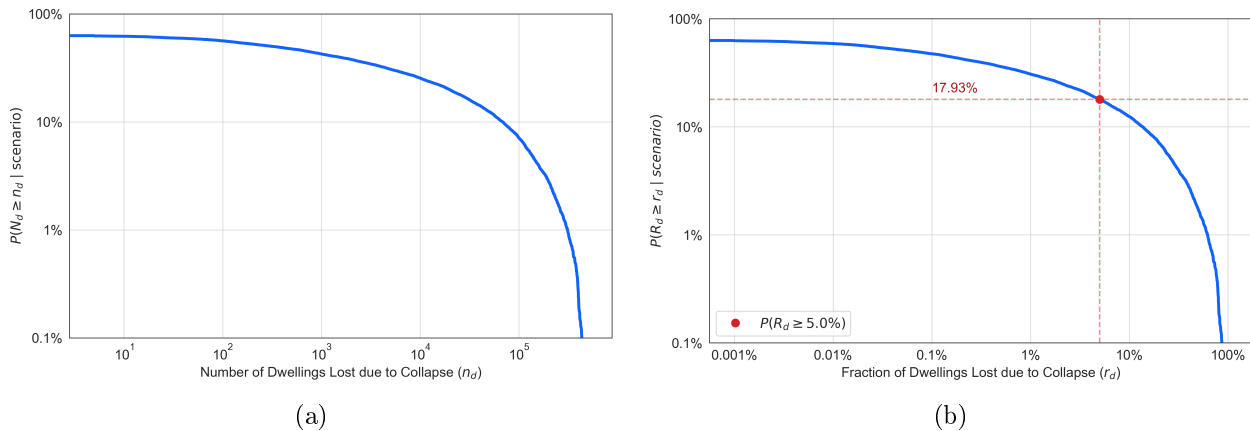


Figura 14: Curvas de probabilidad de excedencia de (a) el número de viviendas perdidas y (b) la fracción de viviendas perdidas, ambos para el escenario de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8.

El análisis indica una mediana de 320 viviendas tipo departamento perdidas y una media de 21,959. Como porcentaje del inventario total de viviendas, la mediana de la fracción de viviendas perdidas es 0.06%, mientras que la media representa el 4.38%.

No existe un objetivo de desempeño nacional para un nivel de pérdidas de viviendas aceptables en Chile para dimensionar los resultados. Sin embargo, el umbral del 5% propuesto por Poland (2009) —menos del 5 por ciento de todas las unidades de vivienda pueden encontrarse "inseguras" para ser ocupadas— proporciona un objetivo útil para la comparación. La probabilidad de exceder el umbral del 5% es 17.93% o equivalentemente, una probabilidad del 82.07% de superar este objetivo de desempeño en el área de estudio en edificios residenciales de 5 o más pisos.

5.2. Distribución Espacial del Riesgo en Santiago

Santiago está compuesto por subregiones llamadas *Comunas*. Para una evaluación integral del riesgo se requiere del conocimiento de inequidades del mismo. Por lo tanto, se realizó una desagregación espacial de las RDVs para observar la distribución espacial en el riesgo sísmico entre comunas (subregiones) con el fin de identificar diferencias. Los resultados de este análisis se presentan en la

Figura 15, donde se observa el valor esperado del número total de viviendas perdidas por comuna, y en la Figura 16, donde se muestran los valores esperados de la fracción de viviendas perdidas en cada comuna. Los valores y el mapa que incluye la comuna no mostrada (Lo Barnechea) se presentan en el Anexo B.

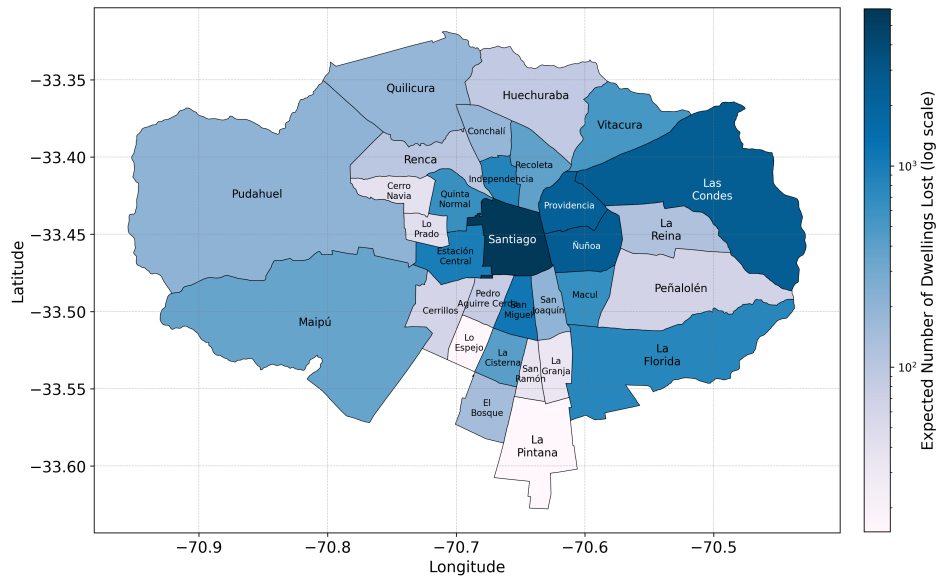


Figura 15: Número esperado de viviendas perdidas por Comuna en Santiago, Chile, debido al escenario sísmico de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8. Se excluye la comuna Lo Barnechea (99 viviendas) debido a su desproporción geográfica.

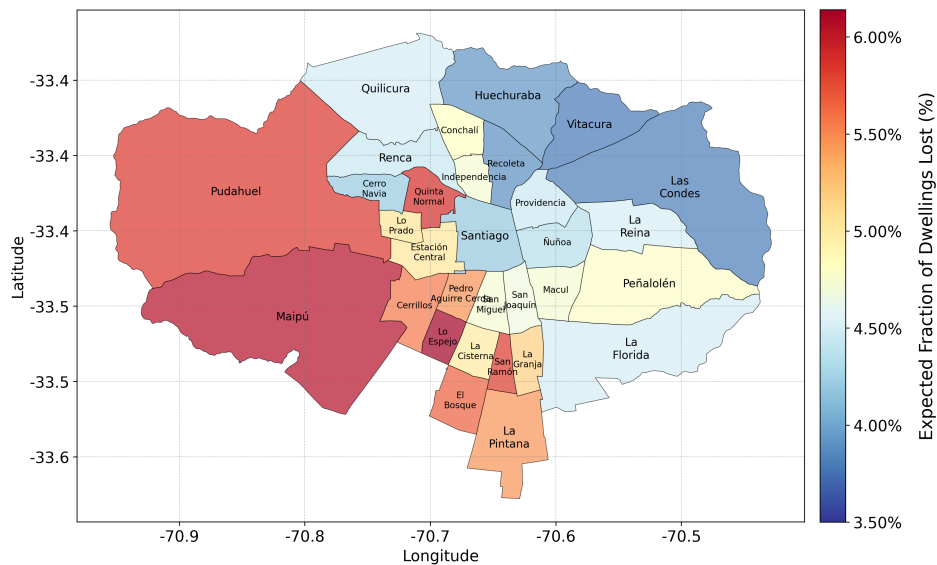


Figura 16: Fracción esperada de viviendas perdidas por Comuna en Santiago, Chile, debido al escenario sísmico de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8. Se excluye la comuna Lo Barnechea (2.62%) debido a su desproporción geográfica. En Anexo B se presentan los valores numéricos.

Naturalmente, las comunas con el mayor número esperado de viviendas perdidas son también las comunas con el mayor número de edificios y viviendas, como las comunas del centro y oriente de la capital. Por lo tanto, el número de estructuras y viviendas son las variable más relevantes para esta RDV.

Sin embargo, se observa una inequidad espacial considerables respecto al valor esperado de la fracción de viviendas perdidas en cada comuna, siendo que es deseable una distribución más equitativa. En el Anexo C se presentan las correlaciones de esta fracción con el promedio de los parámetros V_{s30} , T_g y R_{rup} de todos los edificios de cada comuna. Al respecto, la distancia a la ruptura, R_{rup} , presenta el coeficiente de correlación de Pearson más alto con 0.85, seguida por el V_{s30} con 0.50 y el periodo del suelo, T_g , con 0.27. En el caso de una grilla equiespaciada de 50x50 celdas, estos valores cambian a 0.67, 0.52 y 0.44, respectivamente. Por lo tanto, dado que tiene la mayor correlación, se sugiere que es la distancia a la ruptura la variable que más influye en el valor esperado de la fracción de viviendas perdidas debido a colapso. Adicionalmente, aunque existe correlación con las propiedades del suelo, se requiere una mayor discretización de estas en la ciudad para poder validar con precisión su influencia en las RDV, en especial el v_{s30} dado que muchas comunas presentan el mismo valor.

Esta diferencia no está solo en el valor esperado, sino también en la totalidad de la curva de probabilidad de excedencia. Como se evidencia en la Figura 17 para las comunas de Estación Central y Lo Barnechea, la primera tiene mayores probabilidades para una misma cantidad de viviendas perdidas en comparación con la segunda.

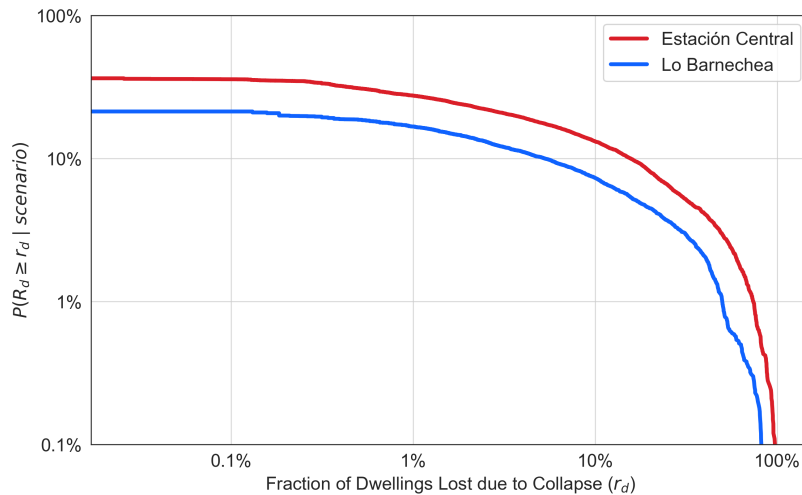


Figura 17: Comparación de las curvas de probabilidad de excedencia de viviendas perdidas debido al colapso para las comunas de Estación Central y Lo Barnechea en el escenario de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8.

5.3. Desagregación del Riesgo por Tipología y Era de Diseño

Desagregar la fracción de viviendas perdidas por tipología de altura ('low-rise', 'mid-rise' y 'high-rise') y por era de diseño ('pre-2010' y 'post-2010') evidencia diferencias en el riesgo, como se muestra en la Figura 18.

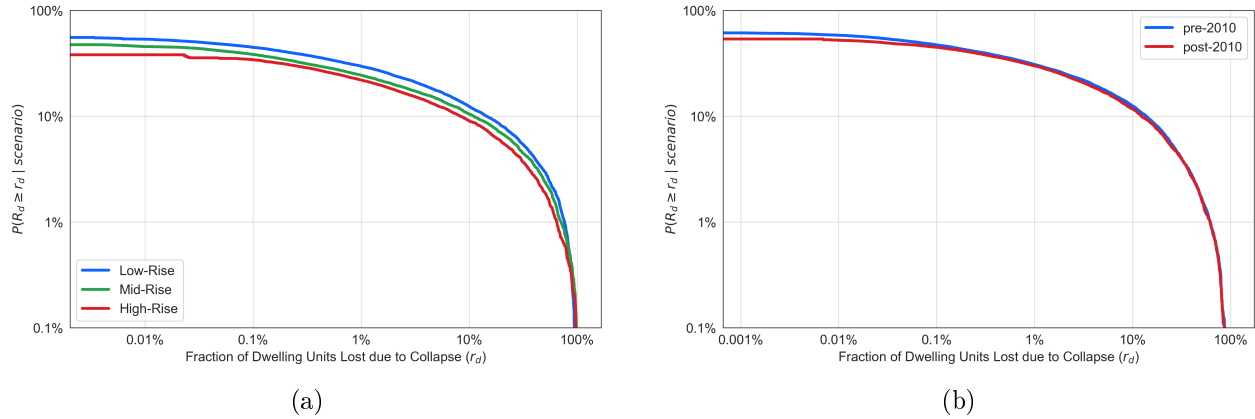


Figura 18: Desagregación por (a) tipología y (b) era de diseño de las curvas de probabilidad de excedencia de viviendas perdidas debido al colapso en el escenario de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8 de 2010.

En la Figura 18a se observa que, para una probabilidad de excedencia dada, la fracción de viviendas perdidas disminuye a medida que aumenta el número de pisos de los edificios que los contienen. Para plantear una hipótesis, se presenta el Anexo D el cual muestra una comparación por tipología de las propiedades del suelo (V_{s30} y T_g), la distancia a la ruptura (R_{rup}) y las medidas de intensidad simuladas (PGA y $Sa(1.0s)$). Dado que tanto las propiedades del suelo como las distancias tienen distribuciones similares y no existe una tendencia clara a aumentar o disminuir, estas variables son descartadas como las causas de la diferencia de las curvas de probabilidad. Por otro lado, comparando las medianas de las medidas de intensidad y las medianas representativas de las capacidades de colapso de las unidades habitacionales —medianas de capacidad de colapso ponderadas por la cantidad de viviendas de cada tipología, las cuales tienen valores de 2.18g, 2.30g y 2.64g para edificios bajos, medios y altos (ver Tabla 2 y Figura 8)—, se evidencia que las capacidades representativas aumentan en mayor medida que las demandas en función de la tipología. Por lo tanto, a nivel regional, el aumento promedio de la capacidad de colapso con la altura, junto con una variación marginal de la demanda sísmica, sugiere que la capacidad de colapso es la variable que más influye en la reducción de la fracción de viviendas perdidas debido a colapso a medida que aumenta la altura de los edificios.

En la Figura 18b se observa que, a nivel regional, los edificios diseñados después del terremoto de 2010 exhiben una reducción marginal en la curva de probabilidad de la fracción de viviendas perdidas en comparación con los edificios diseñados antes del 2010. Este comportamiento resulta contraintuitivo, pues una actualización en la normativa de diseño sísmico debería, teóricamente, disminuir el riesgo de significativamente. Una hipótesis es que, si bien existe una mejora en la mediana representativa de la capacidad de colapso de las viviendas post-2010 respecto a las pre-2010 —con medianas de capacidad de colapso ponderadas por la cantidad de viviendas de 2.33g para pre-2010 y 2.38g para post-2010—, la distribución espacial de las nuevas construcciones está ubicada predominantemente en zonas donde la demanda sísmica es, en promedio, mayor a la donde están ubicados los edificios pre-2010 (ver Anexo E). Esta neutralización entre demanda y capacidad provoca que la fracción de viviendas perdidas debido a colapso sea similar entre ambas eras de diseño.

6. Discusión y Limitaciones

En el modelo de exposición, se asumió que todos los edificios residenciales tenían LLRS de muros de HA para coincidir con el edificio arquetipo de la curva de fragilidad. Puede que no sea fácticamente cierto para todos los edificios de cinco pisos ya que en Santiago existen múltiples villas con edificios de albañilería. Pero, para seis o más pisos es una suposición razonable dada la práctica de diseño chilena. Este LLRS es, por mucho, el más utilizado en edificios residenciales de estas alturas en Chile.

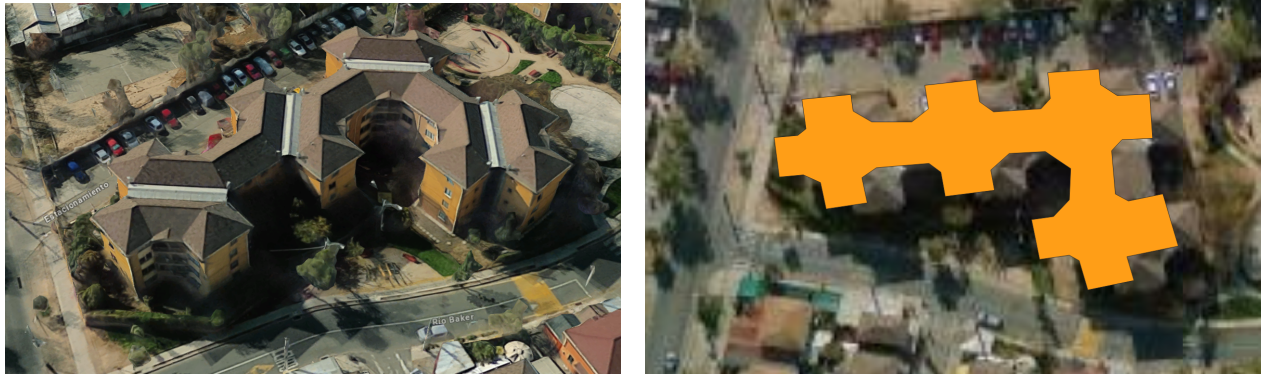
Respecto al desarrollo del modelo de exposición, se agregaron y quitaron múltiples polígonos en la base de datos de huellas para completar y facilitar el trabajo. El beneficio de usar huellas es que se captura la forma y orientación del edificio, la cual puede ser utilizada en análisis de riesgo sísmico regional (Bantis et al., 2025). Estas direcciones principales se encuentran en el Anexo F. Adicionalmente, dado que el ráster de alturas posee un límite máximo de 100m, los edificios residenciales que superen dicha altura —de existir— están subestimados tanto en altura como en número de pisos. Por otro lado, en relación con la clasificación funcional del ráster del GHSL, se seleccionó un umbral del 10 % tras evaluar múltiples umbrales. Con porcentajes muy bajos se descartaban demasiadas huellas de edificios residenciales, mientras que con un umbral del 100 % aún permanecían muchos edificios no residenciales. Por lo tanto, el umbral del 10 % fue el que mejor filtró los elementos no residenciales sin eliminar excesivos registros habitacionales. Por último, el conjunto de datos generado manualmente resultó indispensable para filtrar con alta precisión los edificios no residenciales y asignar atributos críticos como el número de pisos y la era de diseño, especialmente en áreas de alta densidad.

Para fines comparativos, el modelo de exposición propuesto comprende 9,793 edificios residenciales, mientras que el inventario de Aravena et al. (2021) contiene 18,363 edificios con el mismo rango de pisos. Su modelo emplea deep-learning que asigna taxonomías incluso a niveles de confianza bajos. Se realizó una comparación visual en QGIS donde se observó una 'sobredetección' recurrente en el modelo de Aravena et al. (2021). Por ejemplo, como se ilustra en la Figura 19, su modelo identifica numerosos edificios residenciales de cinco o más pisos a lo largo de la Avenida Teniente Cruz. Esta sobredetección pudo verse agravada por el muestreo de imágenes de Google Street View, tomando varias muestras del mismo edificio. En contraste, el modelo de exposición desarrollado en este estudio se limita a las huellas de edificios existentes.



Figura 19: Comparación entre el modelo de exposición propuesto y el de Aravena et al. (2021) en Santiago, Chile. Coordenadas: Longitud: -70.73711, Latitud: -33.46954.

Otro problema en la identificación de edificios es sobre qué se considera un edificio y no múltiples edificios. A modo de ejemplo, en la Figura 20, la pregunta es si esta estructura es solo un edificio o son múltiples edificios idénticos interconectados. En las huellas de OSM (el conjunto de datos de huellas seleccionado), edificios como este a veces se consideran como uno y en otros casos como múltiples edificios. Este problema también puede ser fuente de discrepancias en el número de edificios entre diferentes modelos de exposición como el que tiene este estudio con el de Aravena et al. (2021).



(a) Imagen aérea

(b) Huella de OSM

Figura 20: Ejemplo de problema de identificación de edificios (a) Imagen aérea de Google Maps. (b) Huella de OSM (el conjunto de datos utilizado en este estudio). Coordenadas: Longitud: -70.77013, Latitud: -33.44086.

La cantidad de viviendas y de habitantes de cada edificio fueron extraídos del censo del 2017. Sin embargo, los otros datos son del 2023 (huellas, altura y clasificación funcional). Este desfase temporal causa un problema al momento de asignar las viviendas y habitantes a cada edificio, dado que hay edificios residenciales que no fueron incluidos en ese censo porque se construyeron o habitaron después —o demolieron y deshabitaron—. En el modelo, hay 1,072 edificios con año de construcción posterior al censo. Para superar esta estas inconsistencias, se emplearon múltiples supuestos como asignar valores mínimos y máximos al número de viviendas y habitantes. Este es el censo más actualizado disponible y las mejores estimaciones posibles a escala regional con datos de abiertos.

El modelo de exposición resultante tiene el 70.96 % del total de unidades de vivienda tipo departamento y el 64.79 % del total de habitantes viviendo en departamentos reportadas en el censo de 2017 para la región de estudio. Esta diferencia puede deberse principalmente a dos factores. Primero, hay edificios construidos después del censo. Segundo, los edificios de tres y cuatro pisos no se incluyeron en este modelo de exposición.

El año de construcción es el atributo con la mayor incertidumbre en el modelo de exposición dada la limitada resolución de 30x30m del ráster. Este problema es más evidente en áreas urbanas densas con estructuras de construidas en años muy diferentes, donde los edificios más nuevos están rodeados de estructuras más antiguas. En estos casos, la huella del nuevo edificio inevitablemente interseca píxeles que representan un área circundante más antigua. En consecuencia, la estimación inicial de la media ponderada por área es susceptible a un sesgo significativo hacia estos valores más antiguos. Es por eso que la Figura 7, que incluso excluye el año 1985, está sesgada hacia años más antiguos. Para mitigar esto, se emplearon los métodos posteriores para abordar el problema. Método 2, la intersección con el ráster en años post-2010; Método 3, el uso de la variación de alturas;

y Método 4, el uso de las geometrías con información hecho manualmente.

Es importante notar que el riesgo sísmico realizado en este estudio no depende del año preciso de construcción. Más bien, el análisis se basa únicamente en la era de diseño, es decir, pre-2010 o post-2010. Además, no existen curvas de fragilidad dependientes del tiempo para edificios chilenos en la literatura. Para los análisis de riesgo dependientes del tiempo o evolutivos, es imperativo tener datos más precisos del año de construcción para obtener resultados confiables. El uso de este modelo propuesto en análisis evolutivos del riesgo, se debe considerar el supuesto de que el stock de edificios es estrictamente creciente en el tiempo para escenarios pre-2015. Esta limitación surge porque el ráster empleado solo permite que el modelo capture el año de construcción de los edificios existentes durante 2015, en lugar de representar el desarrollo cronológico del modelo de exposición.

El mismo procedimiento puede replicarse para obtener un modelo de exposición de todas las principales ciudades de Chile (Gran Valparaíso, Gran Concepción y Gran Coquimbo-La Serena) ya que todos los conjuntos de datos utilizados existen para todas esas ciudades. Adicionalmente es actualizable, es decir, si existe alguna base de datos más precisa en el futuro, se puede incorporar fácilmente en el flujo de trabajo propuesto.

Hay una probabilidad del 82.07% de que Santiago cumpla con las recomendaciones del SPUR de que el 95% de las unidades de vivienda sigan operativas para este escenario sísmico de una repetición del terremoto del Maule del 2010. Sin embargo, no se incluyen otros estados de daño que también pueden contribuir a la fracción de viviendas inhabitables (como lo pueden ser severamente dañados, o listos para ser demolidos). Por lo tanto, esta probabilidad de "éxito" puede ser menor que la reportada en este estudio. Esto debe estudiarse para otros escenarios sísmicos y un análisis RPBEE completo con múltiples rupturas para ser confiable.

Las Figuras 15 y 16 muestran una gran disparidad espacial en este escenario sísmico. Respecto al total, la comuna de Santiago Centro muestra los valores más grandes. Esta información puede ser un buen primer enfoque para campañas de búsqueda y rescate, pero se deben estudiar otras RDVs para una toma de decisiones más informada como la cantidad de víctimas fatales o heridos en cada comuna. Respecto a la disparidad de la fracción de viviendas perdidas, Lo Barnechea tiene una media de 2.62% mientras que Maipú tiene 6.49% —es más de dos veces—. Por lo tanto, este escenario es "más riesgoso", en promedio, para ciertas comunas que para otras. Esto puede ser una visión preliminar de una desigualdad en el riesgo sísmico. A pesar de que se pueda intuir que es solo para este escenario dado que las comunas occidentales están más cerca de la ruptura, esto puede ser la norma o tendencia, ya que la mayoría de los megaterremotos en Chile ocurren en la zona de subducción donde la distancia siempre será más corta para las comunas del poniente. Las diferencias pueden ser aún más considerables comparando con otras ciudades más cercanas a la zona de subducción como Viña del Mar.

Si las discrepancias, tanto espaciales como tipológicas, aún existen en un análisis RPBEE completo, considerando todas las rupturas potenciales con sus probabilidades asociadas, será imperativo actualizar las normas de diseño sísmico para lograr un riesgo uniforme dentro y entre ciudades Heresi y Miranda (2023a).

7. Conclusiones

En el presente estudio, se propone un Modelo de Exposición de los edificios residenciales de Santiago de cinco o más pisos con toda la información requerida para un análisis de riesgo sísmico a nivel regional. El catálogo consta de 9,793 edificios residenciales. Los atributos de cada edificio en el modelo abarcan su huella georreferenciada, altura, número de pisos, propiedades del suelo (V_{s30} y T_g), número de viviendas y hogares, número de habitantes, el año de construcción y la era de diseño (pre- o post-2010), fusionando aspectos estructurales, geotécnicos y sociales de cada edificio en el área urbana de Santiago.

El análisis de riesgo sísmico regional aplicado al modelo de exposición propuesto, basado en la ingeniería sísmica basada en el desempeño a nivel regional, resultó en múltiples curvas de probabilidad de excedencia de cuatro RDVs. Entre los hallazgos, el valor mediano de edificios colapsados es 6, menor que las observaciones empíricas durante el terremoto de 2010. En términos de habitabilidad, la mediana de viviendas perdidas es 320, representando el 0.06 % del inventario de viviendas. Además, la probabilidad de cumplir la recomendación de SPUR de menos del 95 % de viviendas perdidas después de una repetición del megaterremoto es 82.07 %, sugiriendo un alto desempeño de la habitabilidad durante este escenario sísmico.

La desagregación espacial de los resultados muestra que el porcentaje esperado de viviendas perdidas debido al colapso no está uniformemente distribuido en el espacio dentro de Santiago. La comuna con el porcentaje esperado más alto de viviendas perdidas es Lo Espejo (6.14 %) y la más baja es Lo Barnechea (2.62 %). La variable con mayor correlación es la distancia a la ruptura. Además, la desigualdad no está solo en la media, sino en toda la curva de probabilidad. Esto puede ser una primera visualización cuantitativa de la desigualdad en el riesgo sísmico a nivel regional, pero se requieren estudios más detallados para confirmar esta hipótesis.

La desagregación por tipología de edificio y era de diseño también reveló disparidades. En primer lugar, el análisis muestra que, a nivel regional, los edificios más altos son, en promedio, menos riesgosos en este escenario en comparación con sus contrapartes de baja altura. En segundo lugar, los edificios diseñados después de 2010 tienen, como grupo, una reducción muy pequeña en el riesgo en comparación con los edificios diseñados antes de 2010.

El propósito del cálculo de estas métricas no son los números en sí, sino una primera aproximación del riesgo a nivel regional en la ciudad. Un escenario no es representativo de toda la amenaza sísmica, pero puede dar una idea sobre heterogeneidades en el riesgo sísmico.

8. Financiamiento

Los autores agradecen el apoyo de ANID para el Proyecto FONDECYT bajo la subvención No. 11230463. El primer autor agradece a *Universidad Técnica Federico Santa María* por becar sus estudios de magíster. El segundo autor agradece el apoyo del Proyecto EASER (*Evolution Assessment of Seismic Risk*) bajo la subvención No. ACT240044.

9. Agradecimientos

Agradezco a Patrick Aravena por compartir su modelo de exposición en primera instancia al inicio de mi tesis.

10. Disponibilidad de Datos

El modelo de exposición está disponible en https://github.com/aleaicr/ExposureModels/tree/main/Chile/01_Santiago/contreras_heresi_2025

11. Referencias

- Abrahamson, N. A., & Gulerce, Z. (2022). Summary of the Abrahamson and Gulerce NGA-SUB ground-motion model for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 38(4), 2638-2681. <https://doi.org/10.1177/87552930221114374>
- Aldea, S., Heresi, P., & Pastén, C. (2022). Within-event spatial correlation of peak ground acceleration and spectral pseudo-acceleration ordinates in the Chilean subduction zone. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(11), 2575-2590. <https://doi.org/10.1002/eqe.3674>
- Aranís, M., Aldea, S., & Heresi, P. (2023). Modelo de correlación espacial de capacidades estructurales para la evaluación del riesgo sísmico a nivel regional. *XIII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica*.
- Aravena, P., Geiss, C., Aguirre, P., Santa María, H., Peña, Y. M., & Taubenböck, H. (2021). Automated building characterization for seismic risk assessment using street-level imagery and deep learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 180, 370-386. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.07.004>
- Bantis, J., Miranda, E., & Heresi, P. (2025). Impact of urban layout and ground motion directionality on building responses and damages in San Francisco during the Loma Prieta earthquake. *Earthquake Spectra*, 0(0), 87552930251378230. <https://doi.org/10.1177/87552930251378230>
- Bravo, D., Larrañaga, O., Millán, I., Ruiz, M., Zamorano, F., Bianchini, R., Feeney, G., & Singh, R. (2013, noviembre). *Final Reports of the 2012 Census Revision Commissions* (Public Issues N.º 1,138) (ISSN 0717-1528). Libertad y Desarrollo. https://lyd.org/storage/other/files_mf/publicissues1138finalreport2012censusrevisioncommissions54.pdf
- Bustos, J., Pastén, C., Pavez, D., Acevedo, M., Ruiz, S., & Astroza, R. (2023). Two-dimensional simulation of the seismic response of the Santiago Basin, Chile. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 164, 107569. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107569>
- Candia, G., Poulos, A., De la Llera, J., Crempien, J., & Macedo, J. (2020). Correlations of spectral accelerations in the Chilean subduction zone. *Earthquake Spectra*, 36, 788-805. <https://doi.org/10.1177/8755293019891723>
- Comerio, M. C. (2014). Housing recovery lessons from Chile. *Journal of the American Planning Association*, 80(4), 340-350.
- Contreras, M., & Winckler, P. (2013). Pérdidas de vidas, viviendas, infraestructura y embarcaciones por el tsunami del 27 de febrero de 2010 en la costa central de Chile. *Obras y proyectos*, 6-19. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132013000200001>

- de la Llera, J. C., Rivera, F., Mitrani-Reiser, J., Jünemann, R., Fortuño, C., Ríos, M., Hube, M., Santa María, H., & Cienfuegos, R. (2017). Data collection after the 2010 Maule earthquake in Chile. *Bulletin of earthquake engineering*, 15(2), 555-588. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9918-3>
- Elnashai, A. S., Gencturk, B., Kwon, O.-S., Al-Qadi, I. L., Hashash, Y., Roesler, J. R., Kim, S. J., Jeong, S.-H., Dukes, J., & Valdivia, A. (2010). *The Maule (Chile) earthquake of February 27, 2010: Consequence assessment and case studies* (Report N.º 10-04). Mid-America Earthquake Center (MAE Center). University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC). <http://hdl.handle.net/2142/18212>
- Gajardo. (2022). Región Metropolitana de Santiago Índice de Prioridad Social de Comunas 2022. https://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/INDICE-DE-PRIORIDAD-SOCIAL-2022_V2.pdf
- Hayes, G. P., Meyers, E., Dewey, J., Briggs, R., Earle, P., Benz, H., Smoczyk, G., Flamme, H., Barnhart, W., Gold, R., & Furlong, K. (2017). *Tectonic summaries of magnitude 7 and greater earthquakes from 2000 to 2015* (Open-File Report N.º 2016-1192). U.S. Geological Survey. Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/ofr20161192>
- Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., & Smoczyk, G. M. (2018). Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, 362(6410), 58-61. <https://doi.org/10.1126/science.aat4723>
- Heresi, P., & Miranda, E. (2022). Structure-to-structure damage correlation for scenario-based regional seismic risk assessment. *Structural Safety*, 95, 102155. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102155>
- Heresi, P., & Miranda, E. (2023a). Regional-risk-targeted seismic design: A novel approach for earthquake resistant design. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 52(13), 3983-4008. <https://doi.org/10.1002/eqe.3972>
- Heresi, P., & Miranda, E. (2023b). RPBEE: Performance-based earthquake engineering on a regional scale. *Earthquake Spectra*, 39(3), 1328-1351. <https://doi.org/10.1177/87552930231179491>
- Huang, X., Wang, C., Li, Z., & Ning, H. (2021). A 100 m population grid in the CONUS by disaggregating census data with open-source Microsoft building footprints. *Big Earth Data*, 5(1), 112-133. <https://doi.org/10.1080/20964471.2020.1776200>
- Hulsey, A. M., Galvis, F. A., Baker, J. W., & Deierlein, G. G. (2024). Elevated collapse risk based on decaying aftershock hazard and damaged building fragilities. *Earthquake Spectra*, 40(1), 674-704. <https://doi.org/10.1177/87552930231220549>
- Hussain, E., Elliott, J. R., Silva, V., Vilar-Vega, M., & Kane, D. (2020). Contrasting seismic risk for Santiago, Chile, from near-field and distant earthquake sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(5), 1533-1555. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1533-2020>
- Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., & Pastén, C. (2017). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(5), 1853-1880. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0050-1>
- INE. (2017). *Metodología de Georreferenciación de Permisos de Edificación*. Consultado el 19 de agosto de 2025, desde https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/geodatos-abiertos/manuales/georeferenciacion/metodologia-de-georeferenciacion-de-permisos-de-edificacion.pdf?sfvrsn=e7e1cf0c_4
- INE. (2018). *Censo de Población y Vivienda 2017*. Consultado el 19 de agosto de 2025, desde <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda>

- Jünemann, R., Cortez, C., Damian, M., Heresi, P., Crempien, J., Urrutia, A., & Zurita, F. (2024). Consistent Fragility Functions for Residential Buildings in Chile. *18th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Jünemann, R., de la Llera, J. C., Hube, M. A., Cifuentes, L. A., & Kausel, E. (2015). A statistical analysis of reinforced concrete wall buildings damaged during the 2010, Chile earthquake. *Engineering Structures*, *82*, 168-185. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.014>
- Kuehn, N., Bozorgnia, Y., Campbell, K., & Gregor, N. (2020). Partially non-ergodic ground-motion model for subduction regions using the NGA subduction database. *PEER Reports*, (2020/04). <https://doi.org/10.55461/NZZW1930>
- Lagos, R., Kupfer, M., Lindenberg, J., Bonelli, P., Saragoni, R., Guendelman, T., Massone, L., Boroschek, R., & Yañez, F. (2012). Seismic performance of high-rise concrete buildings in Chile. *International Journal of High-Rise Buildings*, *1*(3), 181-194.
- Marconcini, M., Metz-Marconcini, A., Üreyen, S., Palacios-Lopez, D., Hanke, W., Bachofer, F., Zeidler, J., Esch, T., Gorelick, N., Kakarla, A., Paganini, M., & Strano, E. (2020). Outlining where humans live, the World Settlement Footprint 2015. *Scientific Data*, *7*(1), 242. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00580-5>
- McFarland, M., Emanuele, R., Morris, D., & Augspurger, T. (2022, octubre). *Microsoft/PlanetaryComputer: October 2022* (Ver. 2022.10.28). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7261897>
- Michelini, E., Belletti, B., Franceschini, L., & Martinelli, E. (2023). Time-dependent seismic fragility curves for existing RC core-wall buildings exposed to corrosion. *Structural Concrete*, *24*(1), 170-188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/suco.202200373>
- Ministerio de Educación. (2013). *La reconstrucción en Educación: Una mirada a los procesos y desafíos en la reconstrucción de la infraestructura escolar dañada en el terremoto y maremoto del 27/F*.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2011). Decreto Supremo N 61: Aprueba reglamento que fija el diseño sísmico de edificios. Santiago, Chile. <https://www.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/05/DECRETO-61-2011-DISENO-SISMICO-DE-EDIFICIOS.pdf>
- Moehle, J., & Deierlein, G. G. (2004). A framework methodology for performance-based earthquake engineering. *13th world conference on earthquake engineering*, *679*, 12.
- Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodríguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *107*(2), 901-911. <https://doi.org/10.1785/0120160221>
- OECD. (2012). *Disaster Risk Assessment and Risk Financing: A G20/OECD Methodological Framework*. <https://doi.org/10.1787/8f48d476-en>
- OpenStreetMap contributors. (2024). Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org>.
- Parker, G. A., Stewart, J. P., Boore, D. M., Atkinson, G. M., & Hassani, B. (2022). NGA-subduction global ground motion models with regional adjustment factors. *Earthquake Spectra*, *38*(1), 456-493. <https://doi.org/10.1177/87552930211034889>
- PEER. (2004). Performance-Based Earthquake Engineering Methodology [Accessed: 2024-06-07].
- Pesaresi, M., Schiavina, M., Politis, P., Freire, S., Krasnodębska, K., Uhl, J. H., Carioli, A., Corbane, C., Dijkstra, L., Florio, P., et al. (2024). Advances on the Global Human Settlement Layer by joint assessment of Earth Observation and population survey data. *International Journal of Digital Earth*, *17*(1), 2390454. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2390454>
- Poland, C. (2009). *Defining resilience: What San Francisco needs from its seismic mitigation policies*. SPUR (San Francisco Bay Area Planning; Urban Research Association).
- Ruiz, S., & Madariaga, R. (2018). Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile. *Tectonophysics*, *733*, 37-56. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.01.015>

- Santa María, H., Hube, M. A., Rivera, F., Yepes-Estrada, C., & Valcárcel, J. A. (2017). Development of national and local exposure models of residential structures in Chile. *Natural Hazards*, 86(1), 55-79. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2518-3>
- Sirko, W., Asiedu Brempong, E., T. C. Marcos, J., Annkah, A., Korme, A., Hassen, M. A., Sapkota, K., Shekel, T., Diack, A., Nevo, S., Hickey, J., & Quinn, J. (2024). High-Resolution Building and Road Detection from Sentinel-2 [Version v3, last revised 18 September 2024; accessed 17 August 2025]. <https://arxiv.org/abs/2310.11622>
- Sirko, W., Kashubin, S., Ritter, M., Annkah, A., Bouchareb, Y. S. E., Dauphin, Y., Keyzers, D., Neumann, M., Cisse, M., & Quinn, J. (2021). Continental-Scale Building Detection from High Resolution Satellite Imagery. *CoRR*, abs/2107.12283. <https://arxiv.org/abs/2107.12283>
- Taubenböck, H., Mast, J., Geiß, C., Wurm, M., Esch, T., & Seto, K. (2024). Global differences in urbanization dynamics from 1985 to 2015 and outlook considering IPCC climate scenarios. *Cities*, 151, 105117. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105117>
- USGS. (2011). *Report on the 2010 Chilean Earthquake and Tsunami Response* (Open-File Report N.º 2011-1053, v. 1.1) (Principal Investigators: Richard Hinrichs, Lucy Jones, Ellis M. Stanley, Sr., and Michael Kleiner. American Red Cross Multi-Disciplinary Team). U.S. Geological Survey. Reston, Virginia. <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1053/>
- Vásquez, J., & Heresi, P. (2023). Evaluación del riesgo sísmico de edificios con muros de sección T de hormigón armado en Chile. *XIII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica ACHISINA 2023*, 12.
- Villar-Vega, M., Silva, V., Crowley, H., Yepes, C., Tarque, N., Acevedo, A. B., Hube, M. A., Gustavo, C. D., & María, H. S. (2017). Development of a fragility model for the residential building stock in South America. *Earthquake Spectra*, 33(2), 581-604. <https://doi.org/10.1193/010716EQS005M>
- Wallace, J. W., Massone, L. M., Bonelli, P., Dragovich, J., Lagos, R., Lüders, C., & Moehle, J. (2012). Damage and implications for seismic design of RC structural wall buildings. *Earthquake Spectra*, 28(1_suppl1), 281-299. <https://doi.org/10.1193/1.4000047>

Anexos

A. Distribución de habitantes por vivienda

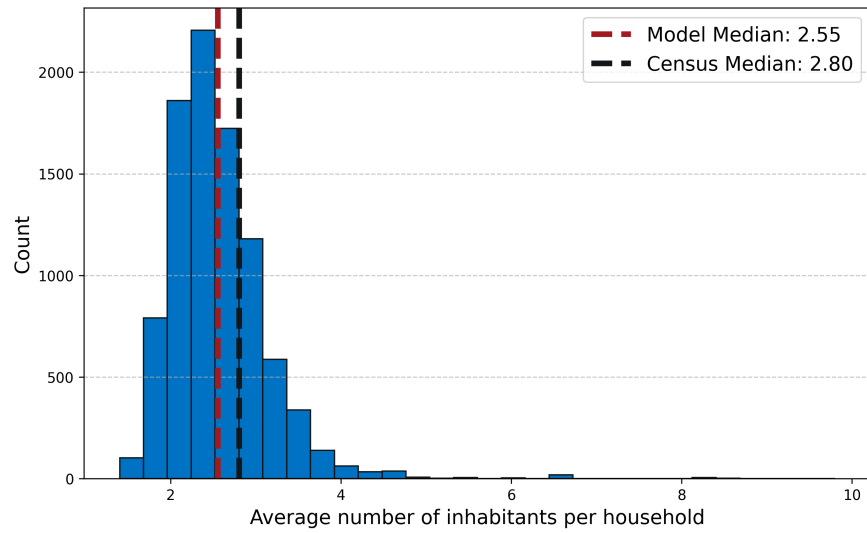


Figura 21: Distribución del número de habitantes por vivienda en el modelo de exposición antes de asignar el valor máximo.

B. Valor esperado de la fracción de viviendas perdidas por comuna

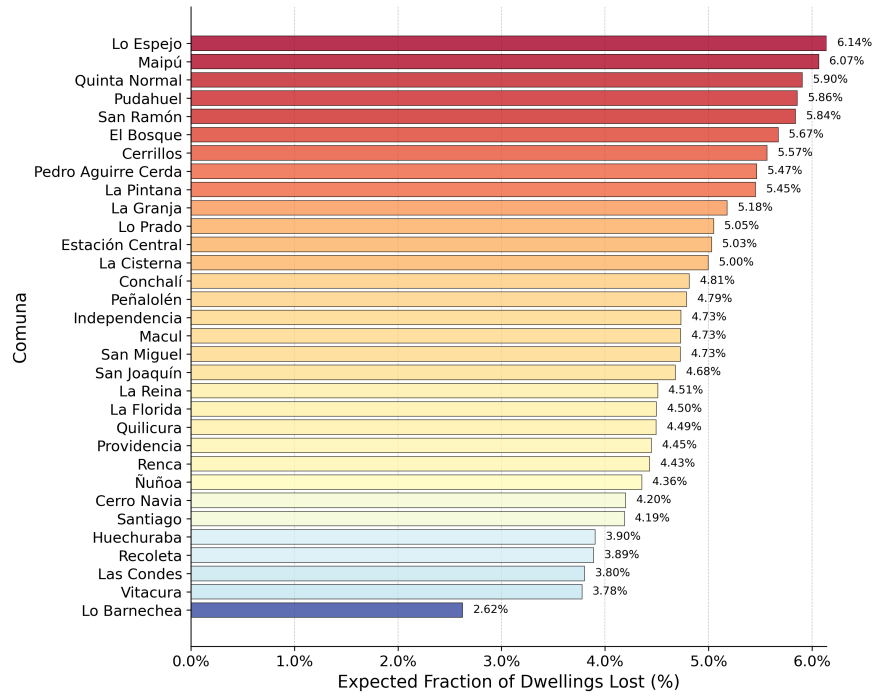


Figura 22: Valor esperado de la fracción de viviendas perdidas por Comuna en Santiago, Chile, con valores numéricos, durante el escenario sísmico de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8.

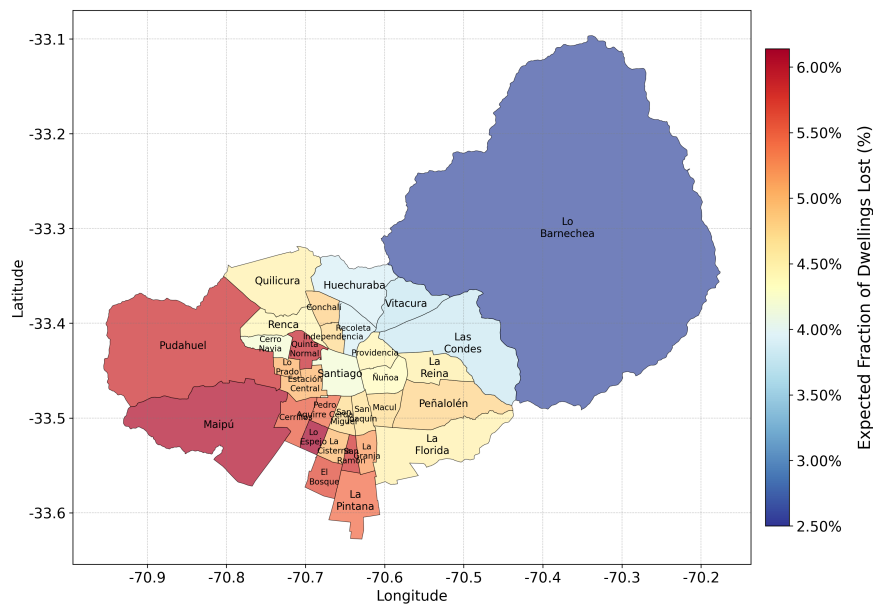


Figura 23: Mapa del valor esperado de la fracción de viviendas perdidas por Comuna en Santiago, Chile, durante el escenario sísmico de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8.

C. Correlación entre las propiedades del suelo y el riesgo sísmico

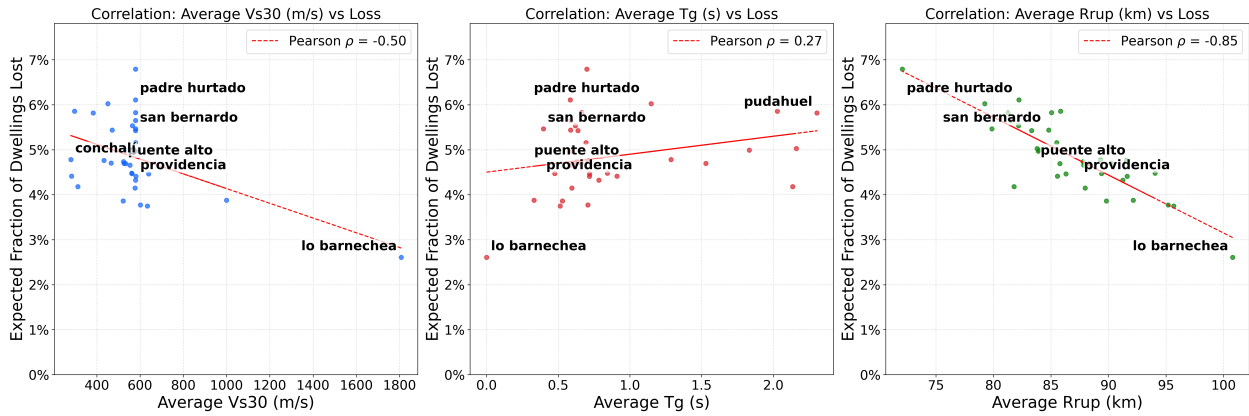


Figura 24: Correlación entre el promedio de las propiedades del suelo de los edificios de cada comuna y su riesgo sísmico en Santiago, Chile, durante el escenario sísmico de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8.

Equivalentemente, se utilizó una grilla de 50x50 divisiones para obtener un mayor número de subdivisiones que permiten tener un mejor entendimiento de la distribución espacial.

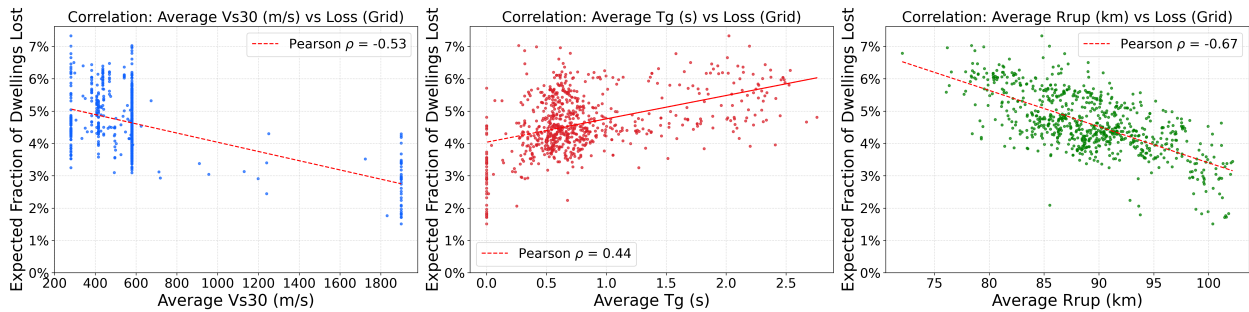


Figura 25: Correlación entre el promedio de las propiedades del suelo de los edificios de cada división (grilla de 50x50 divisiones) y su riesgo sísmico en Santiago, Chile, durante el escenario sísmico de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8.

D. Desagregación de información por tipología

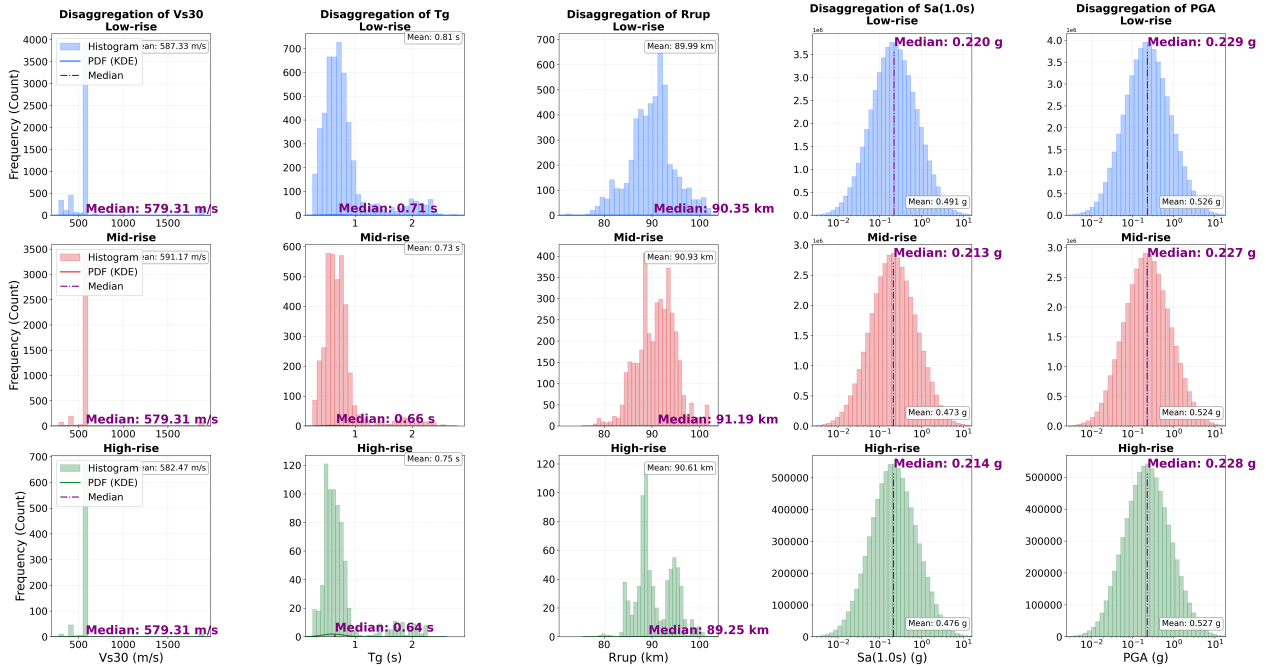


Figura 26: Distribuciones y medianas de V_{s30} , T_g , R_{rup} y IM_d por tipología de altura en Santiago, Chile, durante el escenario sísmico de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8.

E. Desagregación de información por era de diseño

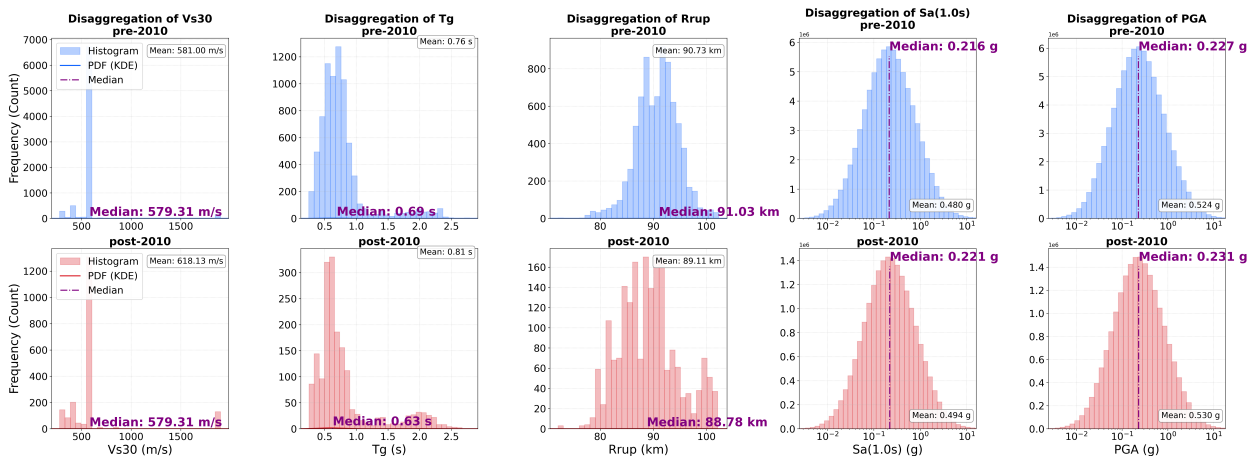


Figura 27: Distribuciones y medianas de V_{s30} , T_g , R_{rup} e IM_d por era de diseño en Santiago, Chile, durante el escenario sísmico de una repetición del terremoto del Maule M_w 8.8.

F. Orientaciones de los edificios

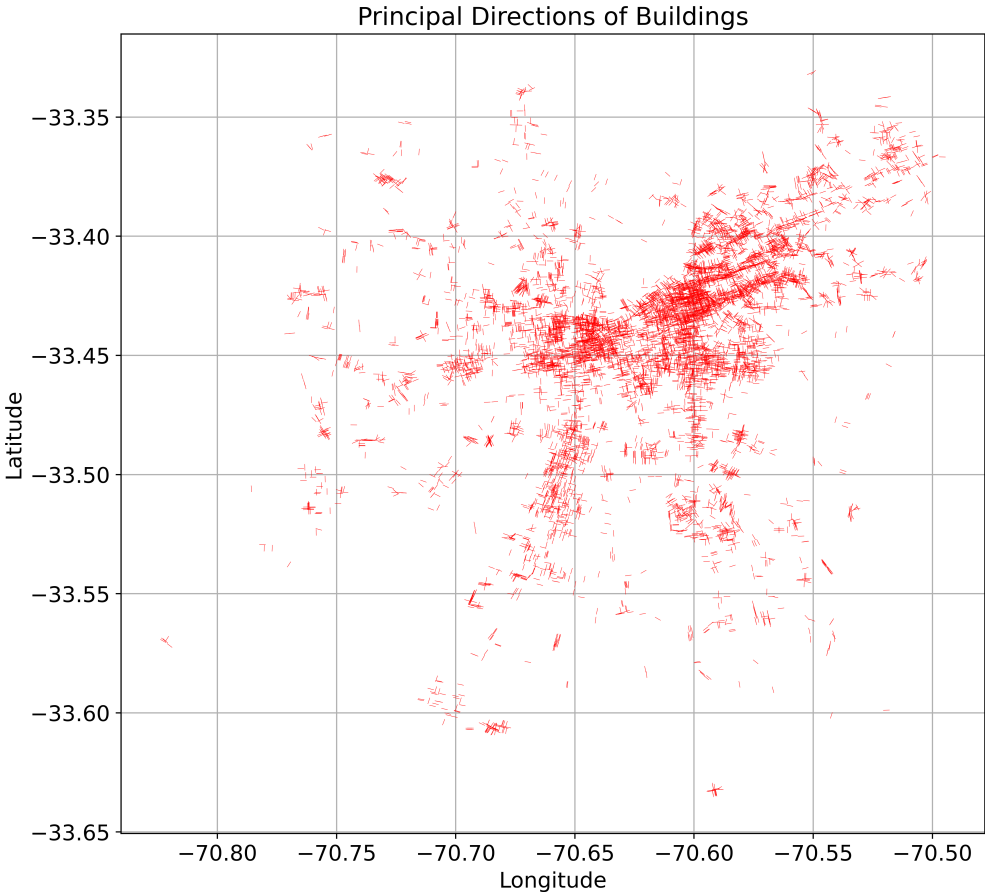


Figura 28: Distribución de las orientaciones principales de los edificios en el modelo de exposición.