

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**CRECIMIENTO VERTICAL DE VIVIENDAS DE
ALBAÑILERÍA INFORMAL Y LOS EFECTOS EN SU
VULNERABILIDAD SÍSMICA**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORA:

Briggite Jackeline Espinoza Sifuentes

ASESOR:

Luis Angel Moya Huallpa

Lima, Octubre, 2024

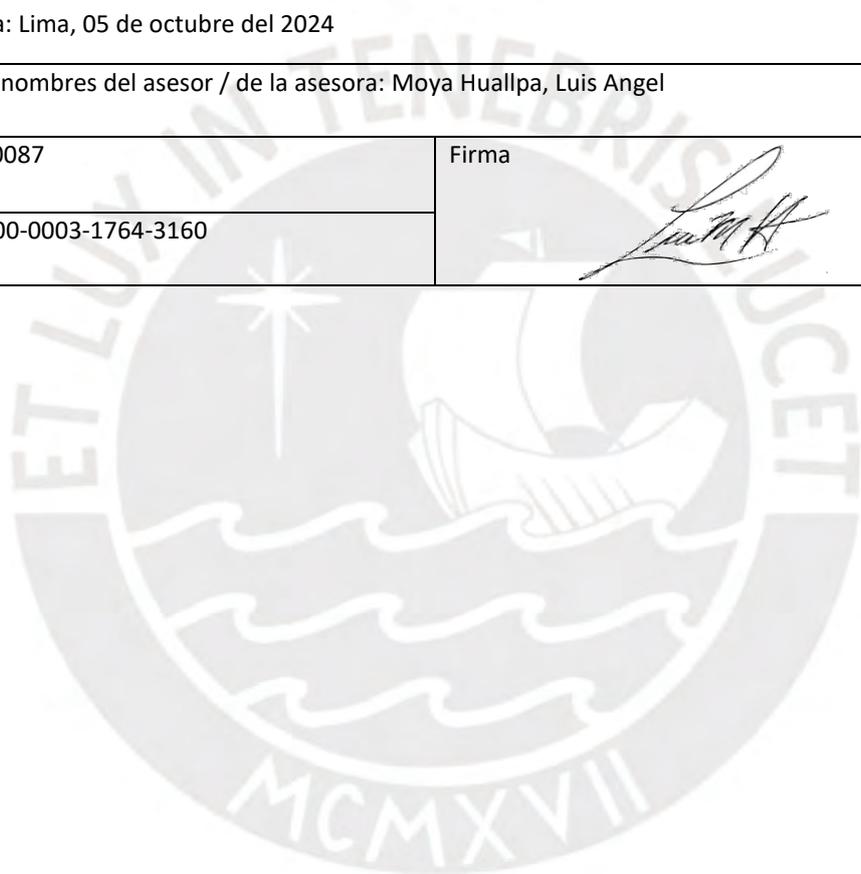
Informe de Similitud

Yo, **Luis Angel Moya Huallpa**, docente de la **Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú**, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado **Crecimiento vertical de viviendas de albañilería informal y los efectos en su vulnerabilidad sísmica**, de la autora **Briggite Jackeline Espinoza Sifuentes**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 22%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 01/10/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 05 de octubre del 2024

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Moya Huallpa, Luis Angel	
DNI: 43010087	Firma 
ORCID: 0000-0003-1764-3160	



RESUMEN

La investigación aborda la problemática de la informalidad en la construcción de viviendas de albañilería en Lima, específicamente en los distritos de Pachacamac, Carabayllo, Cieneguilla y Ate. Se destaca que entre 2007 y 2014, el 68.5% de las edificaciones en la ciudad fueron construidas de manera informal, lo cual agrava la preocupación por la vulnerabilidad sísmica en una zona de alto riesgo. El objetivo principal es analizar el impacto del crecimiento vertical de estas viviendas en su vulnerabilidad sísmica actual y futura.

La metodología empleada comienza con una revisión de literatura sobre el crecimiento vertical y la informalidad en Lima, seguida por la identificación y definición de las zonas de interés. La matriz de crecimiento vertical se estima utilizando datos de Google Street View y levantamientos de campo. Asimismo, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica actual se realiza mediante curvas de fragilidad, proyectándose también para los años 2033, 2043 y 2053. Por último, se realiza un análisis comparativo entre la probabilidad de daño actual y pronosticada para fundamentar las conclusiones.

En consecuencia, se identifica un crecimiento vertical acelerado en zonas altamente transitadas y se proyecta el número de pisos en períodos de 10, 20 y 30 años utilizando la matriz de velocidad obtenida. El estudio muestra que el aumento en la vulnerabilidad sísmica impacta significativamente la probabilidad de daño, especialmente durante la primera década proyectada. Se recomienda una investigación adicional sobre curvas de fragilidad para viviendas con más de tres pisos y la expansión de las áreas de estudio para mejorar la precisión de los resultados. En conjunto, la tesis contribuye al entendimiento del impacto del crecimiento vertical en la vulnerabilidad sísmica, proporcionando valiosas perspectivas para la planificación urbana y la gestión del riesgo sísmico en ciudades similares.

ÍNDICE

Capítulo 1: Aspectos Generales	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general.	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Justificación e Hipótesis	2
1.3.1. Justificación.....	2
1.3.2. Hipótesis.....	3
1.4. Metodología.....	3
Capítulo 2: Estado del Arte.....	5
2.1. Antecedentes.....	6
2.1.1. Antecedentes internacionales.	6
2.1.2. Antecedentes nacionales.	8
2.2. Bases teóricas	9
2.2.1. Escenario sísmico de Lima Metropolitana.	10
2.2.2. Crecimiento vertical de viviendas de albañilería informal.....	12
2.2.3. Curvas de fragilidad.	13
Capítulo 3: Obtención de la Matriz “P” de Velocidades de Crecimiento Vertical	17
3.1. Cuantificación de número de pisos de viviendas analizadas	17
3.2. Construcción de la matriz P.....	21
Capítulo 4: Vulnerabilidad Sísmica Actual de las Zonas a Pronosticar.....	26
4.1. Datos y áreas de estudio	26
4.2. Obtención de funciones de fragilidad.....	27
Capítulo 5: Pronóstico de vulnerabilidad sísmica de la zona escogida	30
5.1. Pronóstico de crecimiento vertical	30

5.2. Análisis comparativo de vulnerabilidad sísmica actual y futura	33
Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones	36
Referencias	38



LISTA DE FIGURAS

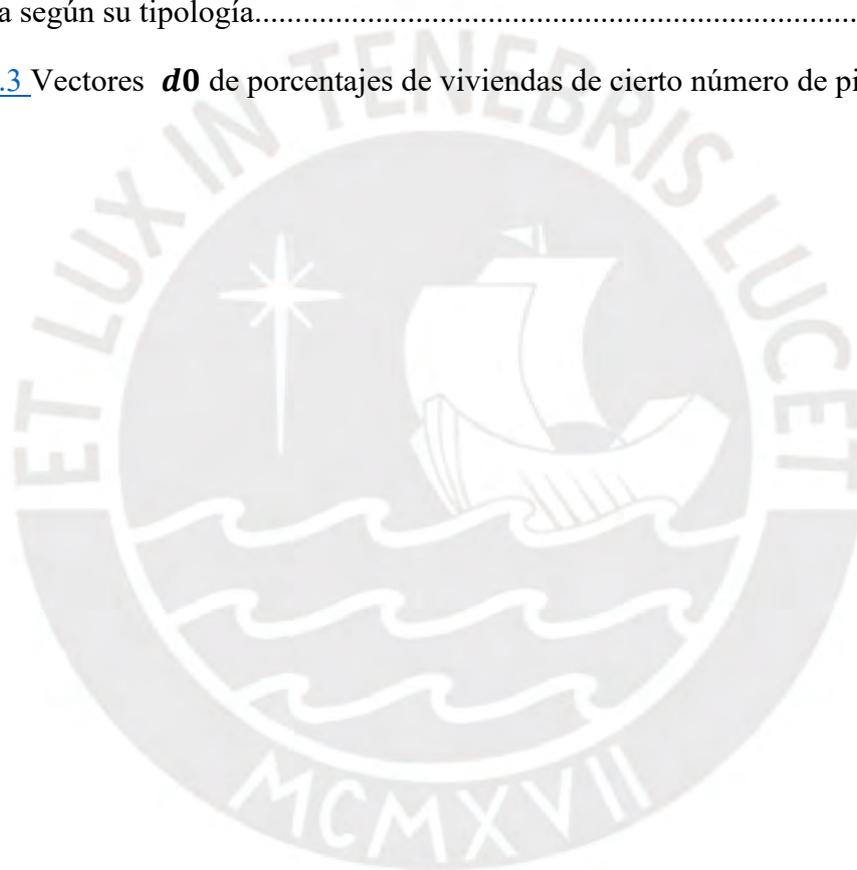
Figura 2.1. Proceso de deformación por la presencia de una aspereza o ZMAS en zonas de subducción antes de la ocurrencia de un sismo (Tavera, 2020).....	10
Figura 2.2 Áreas de intensidades sísmica que produciría un sismo de 8.8 Mw similares a las del terremoto de 1746 (Yauri, 2017).....	11
Figura 2.3. Evolución del 2013 al 2023 de los pisos de tres viviendas de albañilería informal de la Av. Cieneguilla en Lima. Fuente: Elaboración Propia.....	12
Figura 3.1. Mapa de localización de las zonas de estudio. Fuente: Elaboración propia.	18
Figura 3.2. Matrices T para cada zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 3.3. Matrices T por década para cada zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 3.4. Matrices P para cada zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura 4.1. Mapa de localización de las zonas a pronosticar. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 4.2. Histogramas de (a) PGA y (b) Sa de la zona Este. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 4.3. Histogramas de (a) PGA y (b) Sa de la zona Centro. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 4.4. Histogramas de (a) PGA y (b) Sa de la zona Norte. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 4.5. Probabilidades de daño para cada zona analizada en el año 2023. Fuente: Elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5.1. Matrices T por década para cada subgrupo. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 5.2. Matrices P para cada subgrupo. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 5.3. Pronóstico de crecimiento vertical de la zona Este para el 2033, 2043 y 2053. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 5.4. Pronóstico de crecimiento vertical de la zona Centro para el 2033, 2043 y 2053. Fuente: Elaboración propia.	32

Figura 5.5. Pronóstico de crecimiento vertical de la zona Norte para el 2033, 2043 y 2053. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 5.6. Vectores d de la zona Este para el 2033, 2043 y 2053. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 5.7. Vectores d de la zona Centro para el 2033, 2043 y 2053. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 5.8. Vectores d de la zona Norte para el 2033, 2043 y 2053. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 5.9. Probabilidades de daño de la zona (a) Este, (b) Centro y (c) Norte para el 2033, 2043 y 2053, considerando el crecimiento vertical. Fuente: Elaboración propia.	35



LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros para elaborar funciones de fragilidad para viviendas de albañilería.....	16
Tabla 3.1 Información sobre recopilación de datos para cuantificar el número de pisos	19
Tabla 4.1 Número de viviendas con cierta cantidad de pisos por cada zona a pronosticar	27
Tabla 4.2 Parámetros requeridos para determinar la probabilidad de daño en cada vivienda según su tipología.....	28
Tabla 4.3 Vectores d0 de porcentajes de viviendas de cierto número de pisos	28



Capítulo 1: Aspectos Generales

1.1. Introducción

Según datos recientes del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), uno de cada cuatro habitantes urbanos de América Latina y El Caribe vive en un asentamiento informal, por lo que deben promoverse las investigaciones sistemáticas que detallen cuáles son las implicancias de residir en este tipo de viviendas (Duhalde, 2014). En el Perú, según la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO), a partir de censos nacionales se estimó que el 68.5% de las viviendas construidas entre el año 2007 y el 2014 en Lima Metropolitana fueron edificadas informalmente (CAPECO, 2018). Estas viviendas son comúnmente denominadas como “autoconstruidas”, ya que los propietarios, con el paso de los años, deciden recurrir a la informalidad para expandir vertical y horizontalmente sus viviendas con el fin de tener mayor espacio aprovechable.

Asimismo, Lima es una ciudad que presenta alto peligro sísmico, ya que forma parte del conocido “Cinturón de Fuego del Pacífico” cuya denominación se debe a que engloba zonas costeras que suelen ser escenario de un cuantioso número de terremotos y tsunamis causados por la fricción entre placas tectónicas bajo estos territorios. Según un informe técnico del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), de liberarse la energía sísmica acumulada desde el gran terremoto de 1746 entre las placas de Nazca y Sudamericana, correspondientes a la costa peruana, se podría generar un sismo de magnitud entre 8.5 y 8.8 Mw (Yauri, 2017). Esto ha generado, al igual que la informalidad urbana, una mayor atención por analizar sísmicamente las viviendas típicas de la zona, es decir, viviendas de albañilería. Por ello, se han realizado diversos estudios de curvas de fragilidad de este tipo de sistema estructural en el Perú. A su vez, institutos como el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), elaboró un mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Lima, actualizada al año 2016, en el cual se pueden identificar qué zonas corresponden a un cierto nivel de peligro sísmico.

Para 2030, la población mundial alcanzará los nueve mil millones, de los cuales el 60% residirá en ciudades. La mayor parte de este crecimiento urbano ocurrirá en ciudades de países de desarrollo (Naciones Unidas, 2005). Esto causa que los edificios no sean estáticos, sino que evolucionan con el tiempo (Lallemant et al., 2017). En el caso de la ciudad de Lima, comúnmente, las viviendas suelen crecer verticalmente, esto es, que se suelen construir niveles superiores progresivamente. Por consiguiente, resulta necesario

analizar el crecimiento vertical de viviendas de albañilería informal y evaluar los efectos de su vulnerabilidad ante sismos.

Debido a lo mencionado anteriormente, la presente tesis tiene por objetivo cuantificar la velocidad de crecimiento vertical de las edificaciones informales albañilería en Lima Metropolitana. Para esto, se propone adoptar el enfoque probabilístico de Lallemand et al. (2017). Es decir, se pretende calcular la matriz P , definida como la matriz de las probabilidades de crecimiento de las viviendas. Adicionalmente, para mostrar una aplicación de la matriz P , se analizará la variación en el tiempo de la vulnerabilidad sísmica considerando el crecimiento vertical de las viviendas de albañilería.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general.

➤ Analizar el impacto del crecimiento vertical de viviendas de albañilería informal en su vulnerabilidad sísmica mediante curvas de fragilidad para diversas zonas de los distritos de Pachacamác, Carabayllo, Cieneguilla y Ate

1.2.2. Objetivos específicos

➤ Obtener la matriz de velocidades de crecimiento vertical (matriz P) para viviendas de albañilería informal en diversas zonas de los distritos de Pachacamác, Carabayllo, Cieneguilla y Ate

➤ Analizar la vulnerabilidad sísmica de viviendas de albañilería informal en un estado actual de tres zonas a pronosticar

➤ Pronosticar la vulnerabilidad sísmica de viviendas de albañilería recientes para distintos años (2033, 2043, 2053)

1.3. Justificación e Hipótesis

1.3.1. Justificación.

La presente investigación se justifica, desde el punto de vista teórico, ya que aporta con un nuevo conocimiento sobre cómo afecta el crecimiento vertical de viviendas de albañilería informal en su vulnerabilidad sísmica. Lima al ser una ciudad que se ubica en una zona de alto riesgo sísmico, requiere que sus viviendas sean construidas considerando los efectos sísmicos; sin embargo, la población tiende a construir dichas viviendas, principalmente de albañilería informal, con una tendencia a crecer verticalmente. Este cambio de estado en las viviendas implica que su vulnerabilidad sísmica sea alterada, ya

que el comportamiento de una estructura, frente a un sismo, con un cierto número de pisos varía cuando este número de pisos aumenta. Asimismo, desde el punto de vista social, la presente tesis se justifica, debido a que las matrices de velocidades obtenidas se pueden utilizar como apoyo para la gestión local de las zonas con edificaciones cuyo crecimiento vertical se desee predecir.

1.3.2. Hipótesis.

La vulnerabilidad de las viviendas informales de albañilería se incrementa con el tiempo debido al crecimiento vertical.

1.4. Metodología

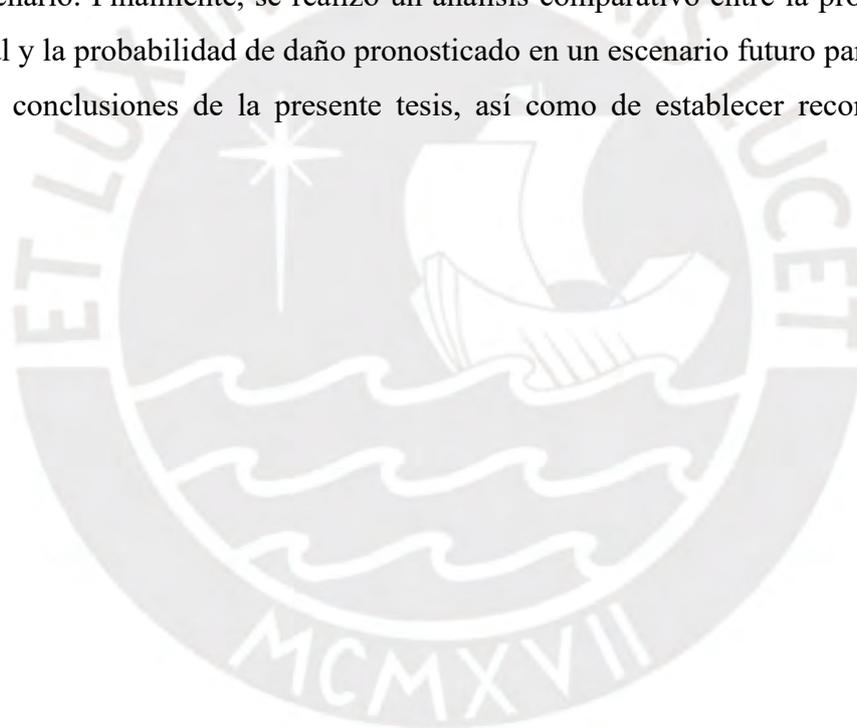
Inicialmente, se realizó una revisión general de la literatura relacionada sobre el crecimiento vertical de viviendas de albañilería. Además, se indagó sobre la informalidad en la construcción en la ciudad de Lima. Asimismo, se investigó acerca del escenario sísmico de esta región y los potenciales distritos a ser los más afectados a causa de un futuro terremoto en la zona. De la misma manera, se averiguó sobre metodologías de análisis de la vulnerabilidad sísmica en cierto edificio. A partir de la información recopilada, se procedió a definir las zonas de interés y se decidió realizar el análisis de vulnerabilidad sísmica en este tipo de viviendas bajo los lineamientos principales de la metodología establecida por Lallemand et al. (2017).

En primera instancia, se estimó la matriz P de probabilidades de crecimiento vertical de las viviendas de albañilería informal. Para ello, inicialmente, se cuantificó el número de pisos de las viviendas de las zonas a analizar mediante la observación de imágenes de Google Street View de los años 2013 y 2014 según se encuentre disponible en esta plataforma para cada zona de estudio. De la misma manera, se cuantificó el número de pisos de estas viviendas en el presente año mediante videos registrados durante inspecciones *in situ* en dichas zonas. Luego de ello, se procedió a calcular la variación de estos números de pisos, es decir, el crecimiento vertical de cada vivienda, y con dichos valores se construyó el arreglo de números. Finalmente, esta matriz P se aproxima mediante la normalización de la matriz M de manera que la suma de cada fila sea igual a la unidad.

En segunda instancia, se estimó la vulnerabilidad sísmica actual de las viviendas de tres zonas que presenten características iniciales similares a las zonas con las que se obtuvo la matriz P. Para ello, se adoptó las curvas de fragilidad para viviendas de

albañilería propuestos por Villar-Vega et al. (2017). Luego, a partir de la lectura de dichas curvas, se procedió a identificar la probabilidad de daño en las viviendas de ocurrir el terremoto pronosticado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP). Dicho evento generará una distribución de aceleraciones sobre todo Lima; por lo tanto, fue necesario georreferenciar las viviendas en el área de estudio con el fin de obtener la aceleración en dichas coordenadas. Para ello, se emplearon los valores del escenario sísmico propuesto en Ceferino et al. (2018).

Por último, se utilizó la matriz P hallada previamente para predecir el crecimiento vertical de aquellas viviendas para distintos años (2033, 2043, 2053). A continuación, con dichos valores y empleando, de la misma manera, las funciones de fragilidad anteriormente mencionadas, se determinó la vulnerabilidad sísmica de las viviendas en un futuro escenario. Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre la probabilidad de daño actual y la probabilidad de daño pronosticado en un escenario futuro para proceder a definir las conclusiones de la presente tesis, así como de establecer recomendaciones finales.



Capítulo 2: Estado del Arte

Inicialmente, se presentan estudios enfocados en los temas principales de la presente tesis de tal forma que se contextualice el estado del arte. A continuación, se desarrolla el marco teórico mediante la presentación de los conceptos necesarios para la comprensión de la investigación. Por un lado, se pretende explicar cuál es el escenario sísmico de Lima Metropolitana, ya que es donde se sitúan las zonas de estudio. Asimismo, se expone sobre cómo es que se desarrolla en el Perú y en mundo el crecimiento vertical de viviendas de albañilería informal; además, se presenta un estudio que se utilizó de referencia para plantear la matriz P que se pretende hallar. Por último, se explica sobre el uso de las funciones de fragilidad y se menciona sobre la tabla de Villar-Vega et al. (2017) que se utilizó para graficar las curvas respectivas.



2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales.

2.1.1.1. Inteligencia artificial en el crecimiento vertical de edificios.

Pérez et al. (2019) en su investigación “*Using AI to simulate urban vertical growth*” [Utilizando la inteligencia artificial para simular el crecimiento vertical urbano] utiliza la inteligencia artificial, mediante algoritmos genéticos y datos históricos, para simular con precisión el crecimiento vertical urbano en el distrito Minato de Tokio, demostrando una alta coincidencia con la realidad, lo que sugiere que el conocimiento sobre la evolución pasada de una ciudad puede utilizarse para predecir su crecimiento vertical futuro. Esta investigación se realizó a edificios de 130 metros o más en el distrito mencionado durante el año 2015 y se caracteriza por ser de tipo observacional y no experimental.

Los resultados arrojados por las simulaciones del algoritmo reflejaron desarrollos reales, ya que tuvieron una precisión del 85,7% para el total de edificios, 86% para alturas acumuladas y 75% para alturas medias de construcciones nuevas iguales o por encima de los 130 metros del 2016 al 2019. Por ello, dedujeron que la computarización si bien no predice lo que sucederá con las infraestructuras, sí puede generar un sistema que simule la realidad con un alto grado de precisión.

Esta investigación es relevante para la presente tesis ya que es un hito en el estado del arte del crecimiento vertical en general por presentar la importancia de conocer la evolución de los edificios a través del tiempo y, además, mostrar los primeros intereses por conocer este crecimiento vertical.

2.1.1.2. Vulnerabilidad que depende del cambio de estado en sistemas estructurales.

Rabonza y Lallemand (2019) en su investigación “*Accounting for time and State-dependent Vulnerability of structural systems*” [Teniendo en cuenta la vulnerabilidad dependiente del tiempo y del estado de los sistemas estructurales] desarrollaron un marco estocástico que tomaba en cuenta la vulnerabilidad que varía con el tiempo y el estado en el análisis de riesgos de sistemas de ingeniería civil. Esto implica utilizar cadenas de Markov para modelar los cambios dinámicos en el estado de las estructuras a lo largo de su vida útil, ya sea aumentando la vulnerabilidad debido al deterioro o disminuyéndola mediante intervenciones de fortalecimiento. La metodología se basa en un enfoque probabilístico que desarrolla una investigación de tipo aplicada.

Como conclusión, detallan que el marco desarrollado permite modelar procesos que aumentan la vulnerabilidad, como el deterioro y la expansión de edificios, así como políticas que la reducen, como un mejor mantenimiento y construcción sísmicamente más resistente.

Este estudio es de importancia para esta investigación ya que sirve de marco de referencia porque presenta una aplicación de las cadenas de Márkov en el análisis de la vulnerabilidad de edificios en su cambio de estado el cual también se aplica en la presente tesis.

2.1.1.3. Modelo de fragilidad para edificios en América del Sur.

Villar-Vega et al. (2017) en el artículo “Development of a fragility model for the residential building stock in South America” [Desarrollo de un modelo de fragilidad para el inventario de edificios residenciales en América del Sur] desarrollaron un modelo de fragilidad uniforme para las tipologías de edificios más comunes en la región de América del Sur con el fin de realizar el análisis de riesgo respectivo, pero a gran escala. A partir de este modelo, realizaron una simulación sísmica mediante osciladores con la que, finalmente, obtuvieron distribuciones de daño que les permitieron crear funciones de fragilidad.

Los modelos de fragilidad resultantes fueron 54 clases de edificios en estos países andinos, por lo que se puede deducir esta investigación es de carácter aplicada. Estas funciones se derivaron de un rendimiento sísmico de 150 osciladores al someterse a un conjunto de 300 registros.

El aporte de este estudio radica en el uso de una de las funciones de fragilidad desarrolladas, ya que se ajusta a las condiciones de las zonas de estudio las cuáles se describen en el capítulo tres de la presente tesis.

2.1.1.4. Evaluación de vulnerabilidad sísmica en edificios en expansión incremental.

Lallemant et al. (2017) en el artículo “A framework and case study for Earthquake vulnerability assessment of incrementally expanding buildings” [Desarrollo de un modelo de fragilidad para el inventario de edificios residenciales en América del Sur] propusieron una metodología para incorporar la fragilidad que depende del tiempo basándose en el crecimiento vertical de edificios de la ciudad de Katmandú. Ellos analizaron áreas de

rápida urbanización en países en desarrollo y crearon un marco para modelar y cuantificar el crecimiento de construcciones informales de la ciudad estudiada.

Finalmente, la investigación logra demostrar que el cambio en el riesgo sísmico de estos edificios es predecible. Además, resaltan que al combinar estos modelos de riesgo probabilístico con herramientas actuales de análisis estructural se pueden simular el crecimiento de los edificios.

Esta metodología se tomará de referencia para la aplicación de la misma en las zonas escogidas de Lima Metropolitana, ya que refleja el análisis del crecimiento vertical en estos edificios y emplea curvas de fragilidad para analizar su vulnerabilidad sísmica.

2.1.2. Antecedentes nacionales.

2.1.2.1. Informalidad y crecimiento urbano en Lima Metropolitana

Cockburn (2020) en su artículo “¡Y llegó el bicentenario! Ciudad, clase social y vivienda en Lima (1821-2020)” analizó el patrón de crecimiento urbano y la atención a la vivienda en Lima durante el periodo republicano (1821-2020), destacando la desigualdad social y espacial a lo largo de tres etapas: 1821-1920 con predominio del mercado en la vivienda, 1921-1989 con definición de ejes de crecimiento y segregación, y 1990-2020 con políticas neoliberales que aumentaron la informalidad y empeoraron la atención a la vivienda.

Concluye en dicho artículo que, a lo largo de los últimos 200 años, el crecimiento demográfico de Lima no ha demostrado mejoras respecto a las condiciones de vida para la mayoría de pobladores a causa de la expansión descontrolada hacia áreas periféricas sin servicios básicos, aumentando la desigualdad social.

Este artículo aporta relevancia a nuestro estudio, ya que resalta la importancia de analizar la informalidad y el crecimiento urbano en Lima Metropolitana.

Igualmente, Vega et al. (2019) en “Las centralidades de Lima Metropolitana en el Siglo XXI” mencionan que Lima no ha logrado equilibrarse entre la estructura urbana y la distribución social de sus espacios residencial; por ello, esta ciudad reprodujo las desigualdades socioespaciales y, por ende, multiplicó la informalidad urbana de tal forma que exista crecimiento urbano en las zonas más alejadas a las metrópolis y que, debido a estas centralidades, la expansión tuvo que desarrollarse verticalmente.

De este libro se destaca que debido a las centralidades existentes en Lima es que el crecimiento urbano se tuvo que producir en las zonas periféricas de forma vertical, ya que el limeño priorizaba encontrarse más cerca a la metrópoli.

2.1.2.2. Vulnerabilidad sísmica de viviendas de albañilería informal en el Perú

Laucata (2013) en su tesis “Análisis de la vulnerabilidad sísmica de las viviendas informales en la ciudad de Trujillo” generó una metodología simple para hallar el riesgo sísmico en las viviendas informales de albañilería confinada en la ciudad de Trujillo. Para esto, analizó las características técnicas de treinta viviendas en dos distritos de esta ciudad; luego, aplicando un análisis sísmico simplificado por medio de la densidad de muros, logró identificar los principales defectos constructivos encontrados en las viviendas analizadas.

En su estudio obtuvo que, según los reportes de vulnerabilidad obtenidos, las viviendas informales en la ciudad analizada frente a un sismo de tipo severo colapsarían en su mayoría.

Esta investigación nos refiere al estado del arte de las investigaciones sobre vulnerabilidad sísmica de vivienda de albañilería informal en distintos departamentos en el Perú, pero que, al encontrarse igualmente en la costa, mantiene condiciones sísmicas similares a nuestras zonas de estudio.

2.1.2.3. Curva de fragilidad en una vivienda de albañilería informal en Lima

Caparachin (2023) en su tesis “Análisis de vulnerabilidad sísmica de una vivienda informal de albañilería confinada empleando la metodología Hazus” empleó dicha metodología para obtener curvas de fragilidad de una vivienda de albañilería informal en el Cercado de Lima. Para su estudio, evaluó las características estructurales y las principales problemáticas de la vivienda, por lo que se puede clasificar como una investigación de campo, cuantitativa y exploratorio.

De esta manera, logró determinar una matriz de probabilidad de daño para dicha estructura con la que finalmente halla la vulnerabilidad sísmica respectiva.

Esta tesis es un ejemplo claro de aplicación de curvas de fragilidad, las cuales emplearemos en este estudio, para analizar la vulnerabilidad sísmica de viviendas de albañilería informal en Lima Metropolitana.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Escenario sísmico de Lima Metropolitana.

Los sismos de mayor magnitud de la zona central del Perú tienen su origen en el proceso de subducción que ocurre entre la placa de Nazca (oceánica) y la placa Sudamericana (continental). Esta subducción se produce de forma sub-horizontal cuando dos placas contiguas convergen generando una superficie de fricción con asperezas conocida como “zona sismogénica” o “zona de máximo acoplamiento sísmico (ZMAS)”. Esta superficie se caracteriza por presentar un área cuyas dimensiones de ruptura resultan proporcionales a la cantidad de energía liberada producida por aquella fricción (Tavera et al., 2014). Las ZMAS se deforman lentamente hasta llegar a un límite en el que se libera la energía mediante un sismo y, en consecuencia, se producen tsunamis (Figura 2.1).

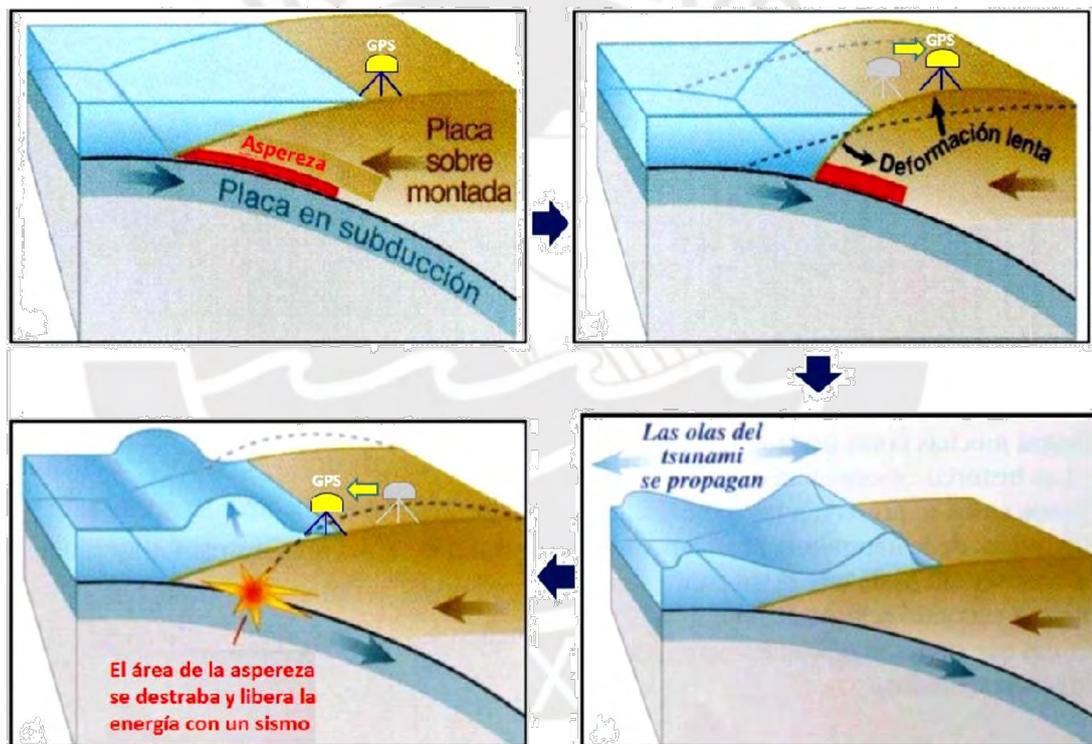


Figura 2.1. Proceso de deformación por la presencia de una aspereza o ZMAS en zonas de subducción antes de la ocurrencia de un sismo (Tavera, 2020).

Gracias a un estudio realizado por Chlieh et al (2011), se ha podido identificar y delimitar la ZMAS correspondiente a diferentes zonas del borde occidental del Perú. Respecto a la región central del Perú, Pulido et al. (2015) logró descomponer dicha zona en círculos durante 272 años para generar deformaciones acumuladas considerando una velocidad de 6 cm/año. Luego, realizó una simulación de este evento y, mediante una

simple transformada de Fourier, obtuvo el registro teórico del sismo. Por último, en este estudio, se concluye que la ZMAS de la región central del Perú originaría un sismo de magnitud 8.8 Mw (Tavera, 2020). A partir de esta información, miembros del INDECI (2017) elaboraron un mapa de intensidades sísmicas (Figura 2.2) en el que se puede identificar los departamentos que serían afectados por el sismo pronosticado.

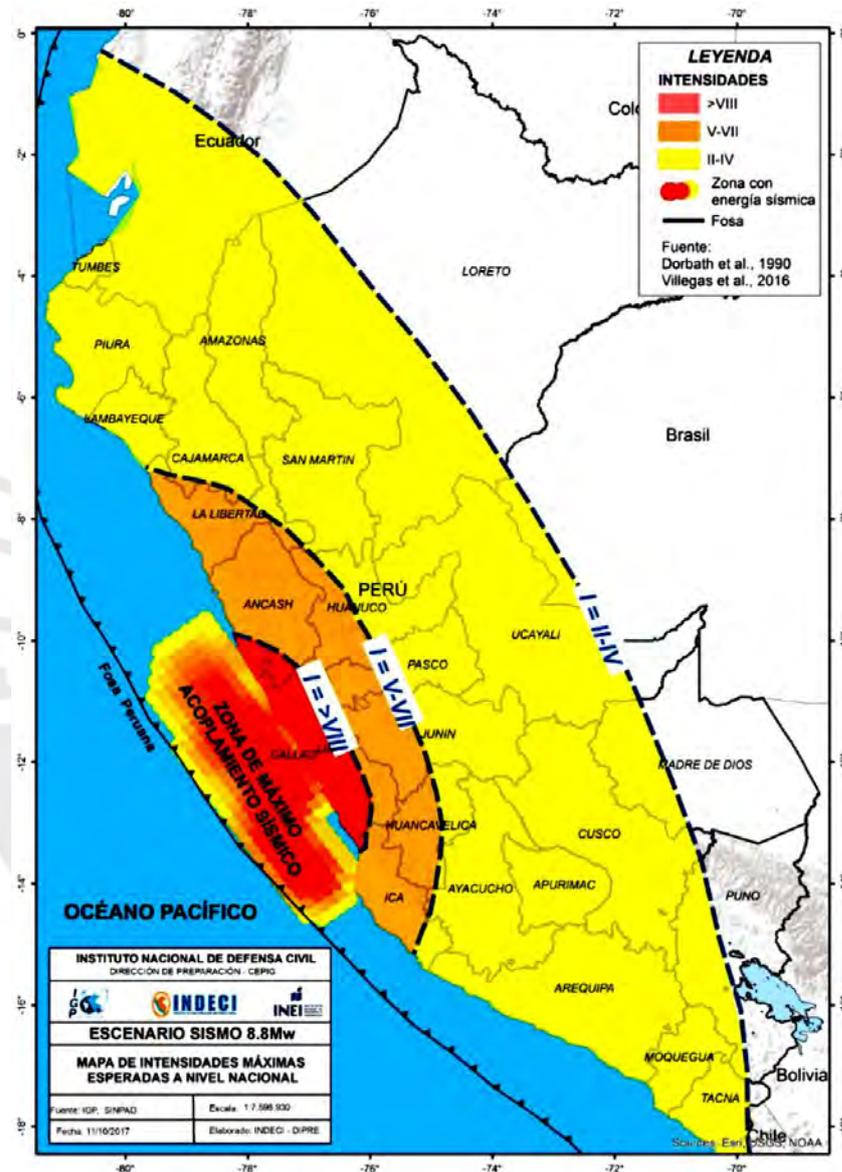


Figura 2.2 Áreas de intensidades sísmica que produciría un sismo de 8.8 Mw similares a las del terremoto de 1746 (Yauri, 2017).

Asimismo, Ceferino et al. (2018), para desarrollar un modelo probabilístico para la estimación de víctimas regionales de gravedad múltiple por daños a la construcción después de un terremoto, utilizó el llamado módulo de intensidad del movimiento del suelo en el cual se estiman valores de aceleraciones pico del suelo (PGA) y aceleraciones espectrales dependientes de cierto periodo ($S_a(T)$). Estos valores se obtuvieron en

formato de 1000 simulaciones de un escenario sísmico en Lima Metropolitana causado por este posible terremoto de 8.8 Mw.

2.2.2. Crecimiento vertical de viviendas de albañilería informal.

Según Lallemand et al. (2017), las viviendas de países en vías de desarrollo comienzan como refugios simples de uno a dos pisos que, debido a factores sociales y/o económico, evolucionan transformándose en viviendas de varios pisos. Por un lado, estos edificios pueden denominarse “estáticos” cuando han sido diseñados o proyectados por arquitectos o ingenieros de tal manera que al construirse se determina el número de pisos para toda su vida útil. Por otro lado, los edificios son considerados “no estáticos” cuando se observa en ellos una evolución en el tiempo mediante el proceso básico de construcción incremental. En el caso de entornos urbanos densos, a nivel del suelo, las viviendas están limitadas por los hogares colindantes. Por ello, la expansión de estos edificios tiende a desarrollarse verticalmente mediante la construcción de pisos adicionales u horizontalmente con pisos adicionales en voladizo sobre las veredas. A continuación, en la *Figura 2.3*, se puede observar un diagrama comparativo del crecimiento vertical de algunas viviendas de albañilería de una de las zonas a estudiar.



Figura 2.3. Evolución del 2014(a) al 2023(b) de los pisos de tres viviendas de albañilería informal de la Av. Víctor Malásquez en Lima. Fuente: Elaboración Propia.

Asimismo, Lallemand et al. (2017) menciona que este crecimiento de pisos en las construcciones a lo largo del tiempo se desarrolla como un proceso discreto, es decir, que incrementa cuantitativamente en números enteros, aunque cabe la posibilidad de que permanezca en su estado actual. Considerando esto, para realizar una simulación del crecimiento vertical de un grupo de viviendas, es necesario desarrollar un modelo de cadena de Márkov. Estos consideran que el estado próximo depende únicamente del estado actual mas no de los estados anteriores (Agresti, 2012). Para plasmar estas transiciones, se procede a plantear una matriz en la que se define la probabilidad de que cierto estado pase a otro en un determinado lapso de tiempo. Esta matriz se plantea de la siguiente manera en la ecuación 2.1.

$$P = \begin{pmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & p_{0,2} & \cdots & p_{0,n} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,n} \\ p_{2,0} & p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n,0} & p_{n,1} & p_{n,2} & \cdots & p_{n,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & p_{0,2} & \cdots & p_{0,n} \\ 0 & p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,n} \\ 0 & 0 & p_{2,2} & \cdots & p_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & p_{n,n} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Donde P es la matriz de velocidades de crecimiento vertical, $p_{i,j}$ es la probabilidad de cambio de i pisos a j pisos de un mismo edificio en un determinado lapso de tiempo, donde $i, j \in \{0,1, \dots, n\}$. Además, se ha realizado una reducción a 0 en los términos bajo la diagonal principal de la matriz, ya que se considera que las viviendas no reducen su extensión o estado (Lallemand et al., 2017).

2.2.3. Curvas de fragilidad.

Para poder comprender a cabalidad la funcionalidad de las curvas de fragilidad, debemos iniciar por definir las distribuciones de probabilidad y cómo a partir de estas se generan las funciones con las que se grafican estas curvas. Para las ecuaciones a presentar, la probabilidad de que ocurra un evento x se denota como $P[x]$.

2.2.3.1. Distribuciones probabilísticas.

De acuerdo a Porter (2021), si se desea conocer la capacidad de cierto edificio de resistir llegar al colapso ante un terremoto, es posible que este no varía en el tiempo; sin embargo, no es posible determinar dicha capacidad hasta que este mismo se derrumbe, por lo que dicha capacidad se considera una variable aleatoria, ya que es incierta. Asimismo, debido a esta incertidumbre, Porter menciona que si requerimos cuantificar esta variable debemos utilizar distribuciones probabilísticas. Entre las distribuciones a analizar se encuentran las que se presentan a continuación.

- Función de densidad de probabilidad $f_X(x)$

La probabilidad de que la variable independiente x sea mayor a un valor a pero menor o igual a un valor de b equivale a la integral de la función para hallar la variable dependiente.

$$P[a < x \leq b] = \int_a^b f_X(x) dx \quad (2.2)$$

- Función de masa de probabilidad $p_X(x)$

Esta función denota la probabilidad de que, para cierto valor particular X de la variable independiente, resulta un cierto valor correspondiente a la variable dependiente.

$$P[X = x] = p_x(x) \quad (2.3)$$

- Función de distribución acumulada $F_X(x)$

Esta función consiste en la función de densidad de una función de masa.

$$P[X \leq x] = \int_{z=-\infty}^x p_x(z) dz = \sum_{z=-\infty}^x p_x(z) \quad (2.4)$$

2.2.3.2. *Distribuciones normal y lognormal.*

Estas distribuciones usualmente se aproximan mediante distribuciones paramétricas para facilitar su análisis (Porter, 2021). A continuación, se muestran las distribuciones lognormal, normal y uniforme. Para estas expresiones se denota la media como μ y la desviación estándar como σ .

- Distribución Normal o Gaussiana

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} = \varphi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (2.5)$$

- Distribución LogNormal

$$F_X(x) = \varphi\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln X}}{\sigma_{\ln X}}\right) \quad (2.6)$$

2.2.3.3. *Función de fragilidad para determinar el estado de daño en un edificio.*

Para analizar la vulnerabilidad sísmica de edificios, se utilizan funciones de fragilidad, también conocidas como curvas de fragilidad, que se definen como expresiones matemáticas con las que se puede determinar la probabilidad de que cierto estado de daño en las viviendas sea alcanzado o superado, dado algún parámetro de demanda ingenieril (Porter et al., 2007). Estas curvas se expresan como una función de

distribución acumulada con la que se determina la probabilidad descrita. A continuación, se detalla los componentes de esta función según lo expuesto por Porter (2021).

$$F_{dm}(edp) \equiv P[DM \geq dm | EDP = edp] \quad (2.7)$$

$$F_{dm}(edp) = \Phi\left(\frac{\ln(edp/x_m)}{\beta}\right) \quad (2.8)$$

- EDP: Parámetro de demanda ingenieril como variable independiente
- edp: Valor particular del parámetro de demanda ingenieril
- DM: Estado de daño en el edificio como variable dependiente
- dm: Valor particular del estado de daño del edificio
- $F_{dm}(edp)$: Estado de daño en función del parámetro de demanda ingenieril
- $P[A | B]$: Probabilidad de que A sea verdadero dado un valor de B verdadero
- $\Phi(\ln(x))$: Distribución lognormal acumulada para un valor de x
- β : Desviación estándar de los valores logarítmicos del parámetro de demanda ingenieril.
- x_m : Media de los valores de la distribución

2.2.3.4. Parámetros para definir las funciones de fragilidad a usar en el presente estudio.

VillarVega et al. (2017) desarrollaron un estudio en el que definen una función de fragilidad correspondiente a distintos materiales de construcción; y, a su vez, los clasifica según el número de pisos que presenta la vivienda analizada y según cuatro estados de daño posibles: ligero, moderado, extenso y colapso. A continuación, se presentan la Tabla 2.1 a utilizar en esta investigación.

Tabla 2.1

Parámetros para elaborar funciones de fragilidad para viviendas de albañilería

Tipología	IM	Estados de Daño								R
		Ligero		Moderado		Extenso		Colapso		
		λ	x	λ	x	λ	x	λ	x	
MUR/H:1	PGA	-1.418	0.310	-0.709	0.328	-0.496	0.322	-0.231	0.317	0.967
MUR/H:2	Sa para 0.3 s	-1.112	0.269	-0.365	0.325	-0.088	0.372	-0.288	0.513	0.956
MUR/H:3	Sa para 0.3 s	-1.189	0.338	-0.520	0.447	-0.216	0.501	-0.220	0.685	0.908
MUR + ADO/H:1	PGA	-1.782	0.371	-0.894	0.326	-0.644	0.328	-0.335	0.346	0.964
MUR + ADO/H:2	Sa para 0.3 s	-1.634	0.273	-0.707	0.367	-0.371	0.447	-0.092	0.610	0.938
MUR + ST99/H:1	PGA	-1.502	0.295	-0.718	0.310	-0.492	0.311	-0.215	0.322	0.965
MUR + ST99/H:2	Sa para 0.3 s	-1.270	0.279	-0.427	0.370	-0.120	0.455	-0.315	0.637	0.938
MCF/H:1	PGA	-0.532	0.407	0.251	0.394	0.364	0.377	-0.578	0.382	0.968
MCF/H:2	Sa para 0.3 s	-0.299	0.343	0.477	0.376	0.658	0.406	-1.003	0.494	0.952
MCF/H:3	Sa para 0.3 s	-0.510	0.355	-0.307	0.434	0.551	0.513	-1.002	0.656	0.920
MCF/H:1/DNO	PGA	-0.804	0.307	-0.046	0.320	0.127	0.314	-0.386	0.367	0.970
MCF/H:2/DNO	Sa para 0.3 s	-0.700	0.371	0.130	0.351	0.381	0.433	-0.808	0.490	0.948
MCF/H:3/DNO	Sa para 1.0 s	-2.422	0.495	-1.592	0.573	-1.189	0.587	-0.629	0.608	0.909

Nota. Traducido de "Development of a Fragility Model for the Residential Building Stock in South America" (Villa-Vega et al., 2017).

Donde λ es la media logarítmica, x es la desviación estándar logarítmica, R es el coeficiente de correlación de la curva e IM es el parámetro de demanda ingenieril utilizado. Con estas definiciones, finalmente, la expresión de la curva de fragilidad sísmica queda descrita de la siguiente manera.

$$F_{dm}(IM) = \Phi\left(\frac{\ln(IM) - \lambda}{x}\right) \quad (2.9)$$

Capítulo 3: Obtención de la Matriz “P” de Velocidades de Crecimiento Vertical

3.1. Cuantificación de número de pisos de viviendas analizadas

Se escogieron nueve zonas de cuatro distritos de Lima Metropolitana (Pachacamac, Ate, Cieneguilla y Carabaylo) (Figura 3.1) y se las clasificó según su ubicación por distrito. En esta investigación fue necesario cuantificar el número de pisos de viviendas en dos fechas distintas, el presente año (2023) y un año anterior. Por lo tanto, la disponibilidad de información del número de pisos en las viviendas estudiadas en años anteriores fue un factor importante en la elección de las zonas de estudio. Con respecto a la mencionada limitación, se emplearon imágenes disponibles de la plataforma Google Street View. Por lo tanto, todas las viviendas estudiadas se encuentran junto a una línea de tráfico vehicular. En la figura 3.1 se muestra un mapa de localización de las zonas de estudio. Las zonas más concurridas se distinguen de color rojo y las zonas menos concurridas se distinguen de color azul.

Para cuantificar el número de pisos de las viviendas en el año 2023, se registraron imágenes *in situ* de las viviendas aledañas a las viviendas escogidas. Para ello, se emplearon tres métodos de registro. Por un lado, para tres zonas, se utilizó un dispositivo celular para grabar la vista frontal de las viviendas mientras se trasladaba a lo largo de la ruta escogida en la zona evaluada. Por otro lado, para cinco zonas, se escogió un punto cercano a la zona evaluada y mediante un *drone* se registró imágenes de las viviendas aledañas desde una vista que permitiese cuantificar el número de pisos de estas. Asimismo, particularmente para la zona de Carabaylo02, se visualizaron imágenes de Google Street View tanto para el año 2023 como el año 2013. Se procedió luego a contar el número de pisos de las viviendas de interés.

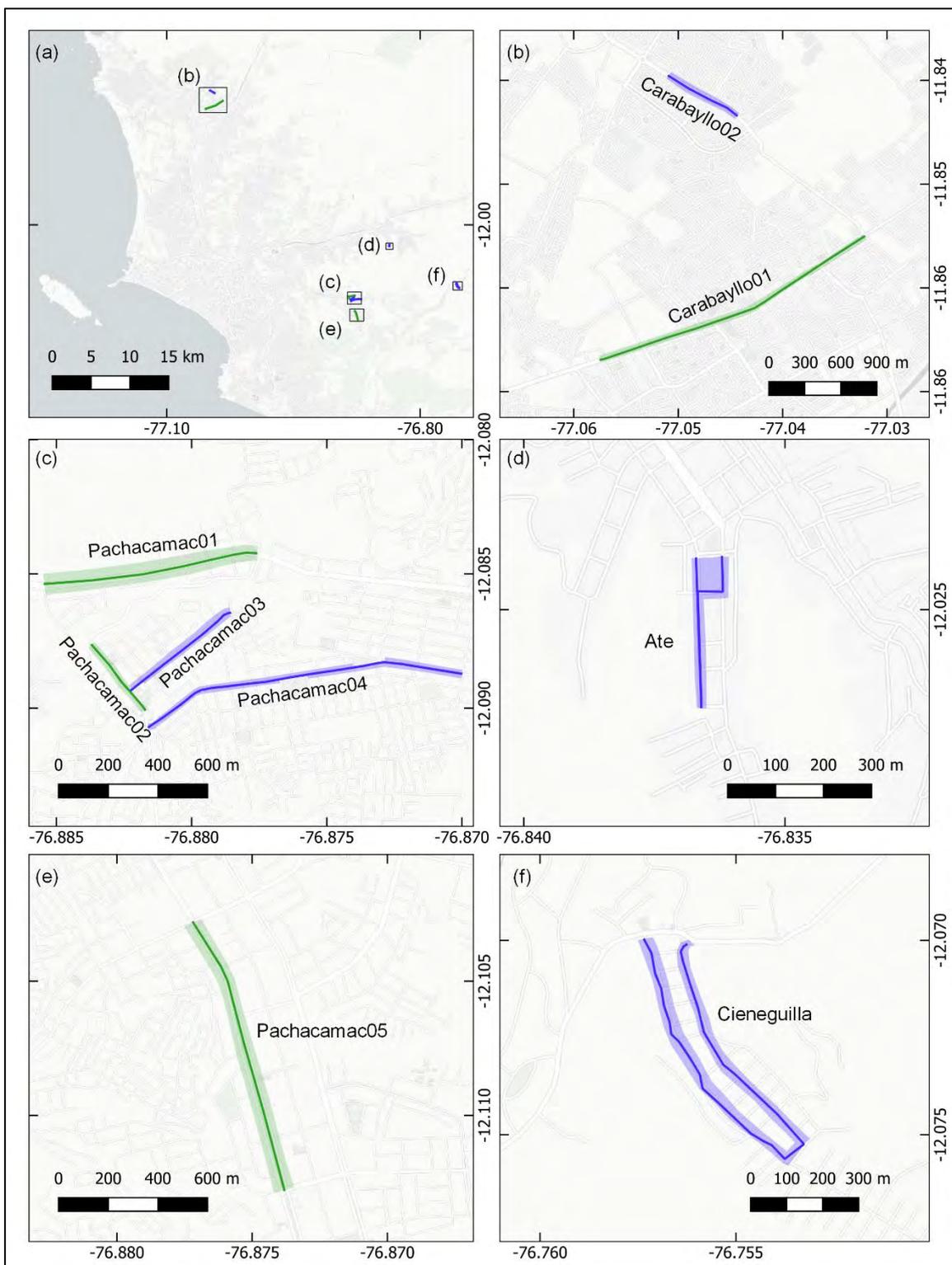


Figura 3.1. Mapa de localización de las zonas de estudio. Fuente: Elaboración propia.

(a) Ubicación de las zonas estudiadas a nivel de Lima Metropolitana. (b) Zonas ubicadas en Carabayllo. (c) y (e) Zonas ubicadas en Pachacamac. (d) Zona ubicada en Ate. (f) Zona ubicada en Cieneguilla.

De la misma manera, para cuantificar el número de pisos de las viviendas hace una década, se visualizaron imágenes de Google Street View para todas las zonas. Cabe

resaltar que, según la disponibilidad de imágenes de la plataforma, para ciertas zonas, las imágenes registradas fueron de hace nueve años. En la tabla 3.1, se indica el método utilizado, el año de registro y el número de viviendas correspondientes a cada zona evaluada.

Tabla 3.1

Información sobre recopilación de datos para cuantificar el número de pisos

<i>Zona evaluada</i>	<i>Calle y/o avenida registrada</i>	<i>Año de registro inicial</i>	<i>Método de registro año inicial</i>	<i>Método de registro año 2023</i>	<i>Número de viviendas registradas</i>
Pachacamác01	Av.Cieneguilla	2013	Google Street View	Celular	200
Pachacamác02	Av. Víctor Malasquez (Zona Norte)	2013	Google Street View	Celular	257
Pachacamác03	Calle Claveles	2014	Google Street View	Drone	70
Pachacamác04	Av. Los Ficus- Av.1-Av. Machu Picchu	2013	Google Street View	Drone	154
Pachacamác05	Av. Víctor Malasquez (Zona Sur)	2014	Google Street View	Drone	172
Carabayllo01	Av. José Saco Rojas	2014	Google Street View	Celular	194
Carabayllo02	Av. Santa María	2013	Google Street View	Google Street View	87
Ate	Quebrada al final de la Av. Jaime Zubieta Calderón	2013	Google Street View	Drone	80
Cieneguilla	Entrada de la Quebrada Río Seco	2014	Google Street View	Drone	97

Nota. Elaboración propia

Cabe mencionar que se tomó en cuenta solo aquellas manzanas aledañas a las calles escogidas que contengan viviendas de albañilería en su mayoría. Asimismo, se consideró como una vivienda de “0 pisos” a terrenos no ocupados dentro de estas manzanas y a construcciones de materiales informales distintos a la albañilería, tales como drywall o madera, indistintamente de su uso particular. Igualmente, se consideraron “viviendas” a aquellas construcciones de albañilería informal dentro de estas manzanas que contaban con por lo menos un piso, indistintamente de su uso particular.

A partir de dicha información, se procedió a elaborar, para cada zona, una matriz llamada T cuyos valores se denotan como $t_{i,j}$, donde t es el número de viviendas que han crecido de i a j pisos, donde $i, j \in \{0,1,\dots,6\}$ y son el número de pisos de las viviendas correspondientes al año inicial y al año 2023 respectivamente. Las matrices T obtenidas se presentan en la figura 3.2 a continuación.

	0	1	2	3	4	5	6
0-	2	8	4	3	0	0	0
1-	0	42	30	10	0	1	0
2-	0	0	45	21	4	0	0
3-	0	0	0	21	7	0	0
4-	0	0	0	0	2	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

	0	1	2	3	4	5	6
0-	18	52	19	8	0	0	0
1-	0	58	32	11	2	0	0
2-	0	0	33	10	1	0	0
3-	0	0	0	8	3	1	0
4-	0	0	0	0	1	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

(a) Pachacamác01

(b) Pachacamác02

	0	1	2	3	4	5	6
0-	8	3	0	1	0	0	0
1-	0	17	10	4	0	0	0
2-	0	0	16	5	0	0	0
3-	0	0	0	6	0	0	0
4-	0	0	0	0	0	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

	0	1	2	3	4	5	6
0-	69	23	25	5	1	0	0
1-	0	15	6	4	0	1	0
2-	0	0	3	1	0	0	0
3-	0	0	0	1	0	0	0
4-	0	0	0	0	0	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

(c) Pachacamác03

(d) Pachacamác04

	0	1	2	3	4	5	6
0-	19	6	2	1	1	0	0
1-	0	65	19	6	2	0	0
2-	0	0	35	4	1	0	0
3-	0	0	0	7	3	0	0
4-	0	0	0	0	0	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	1

	0	1	2	3	4	5	6
0-	52	15	13	8	5	3	0
1-	0	38	10	3	2	1	1
2-	0	0	17	6	3	1	0
3-	0	0	0	10	2	1	0
4-	0	0	0	0	1	0	0
5-	0	0	0	0	0	1	0
6-	0	0	0	0	0	0	1

(e) Pachacamác05

(f) Carabayllo01

	0	1	2	3	4	5	6
0-	54	2	4	4	5	0	0
1-	0	6	0	0	0	0	0
2-	0	0	5	2	0	1	0
3-	0	0	0	1	0	2	0
4-	0	0	0	0	0	0	0
5-	0	0	0	0	0	1	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

	0	1	2	3	4	5	6
0-	11	1	3	0	0	0	0
1-	0	36	11	2	0	0	0
2-	0	0	13	1	0	0	1
3-	0	0	0	1	0	0	0
4-	0	0	0	0	0	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

(g) Carabayllo02

(h) Ate

	0	1	2	3	4	5	6
0-	32	14	3	1	2	0	0
1-	0	34	4	0	1	0	0
2-	0	0	6	0	0	0	0
3-	0	0	0	0	0	0	0
4-	0	0	0	0	0	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

(i) Cieneguilla

Figura 3.2. Matrices T para cada zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Construcción de la matriz P

Una vez obtenidas las matrices T, se decidió uniformizar las matrices de tal manera que todas representen transiciones de 10 años. Por ende, algunas zonas permanecieron con la misma matriz ya que su transición iba del 2013 al 2023; sin embargo, para otras zonas, las cuales presentaban transiciones del 2014 al 2023, se procedió a normalizar su matriz multiplicando sus valores por un factor de 10/9.

De esta forma, se obtuvo las matrices de transición por década que se presentan a continuación (Figura 3.3).

	0	1	2	3	4	5	6
0-	2	8	4	3	0	0	0
1-	0	42	30	10	0	1	0
2-	0	0	45	21	4	0	0
3-	0	0	0	21	7	0	0
4-	0	0	0	0	2	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

	0	1	2	3	4	5	6
0-	18	52	19	8	0	0	0
1-	0	58	32	11	2	0	0
2-	0	0	33	10	1	0	0
3-	0	0	0	8	3	1	0
4-	0	0	0	0	1	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

(a) Pachacamác01

(b) Pachacamác02

	0	1	2	3	4	5	6
0-	8	3	0	1	0	0	0
1-	0	16	11	4	0	0	0
2-	0	0	15	6	0	0	0
3-	0	0	0	6	0	0	0
4-	0	0	0	0	0	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

	0	1	2	3	4	5	6
0-	69	23	25	5	1	0	0
1-	0	15	6	4	0	1	0
2-	0	0	3	1	0	0	0
3-	0	0	0	1	0	0	0
4-	0	0	0	0	0	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

(c) Pachacamác03

(d) Pachacamác04

	0	1	2	3	4	5	6
0-	18	7	2	1	1	0	0
1-	0	62	21	7	2	0	0
2-	0	0	35	4	1	0	0
3-	0	0	0	7	3	0	0
4-	0	0	0	0	0	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	1

(e) Pachacamác05

	0	1	2	3	4	5	6
0-	47	17	14	9	6	3	0
1-	0	37	11	3	2	1	1
2-	0	0	16	7	3	1	0
3-	0	0	0	10	2	1	0
4-	0	0	0	0	1	0	0
5-	0	0	0	0	0	1	0
6-	0	0	0	0	0	0	1

(f) Carabayllo01

	0	1	2	3	4	5	6
0-	54	2	4	4	5	0	0
1-	0	6	0	0	0	0	0
2-	0	0	5	2	0	1	0
3-	0	0	0	1	0	2	0
4-	0	0	0	0	0	0	0
5-	0	0	0	0	0	1	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

(g) Carabayllo02

	0	1	2	3	4	5	6
0-	11	1	3	0	0	0	0
1-	0	36	11	2	0	0	0
2-	0	0	13	1	0	0	1
3-	0	0	0	1	0	0	0
4-	0	0	0	0	0	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

(h) Ate

	0	1	2	3	4	5	6
0-	30	16	3	1	2	0	0
1-	0	34	4	0	1	0	0
2-	0	0	6	0	0	0	0
3-	0	0	0	0	0	0	0
4-	0	0	0	0	0	0	0
5-	0	0	0	0	0	0	0
6-	0	0	0	0	0	0	0

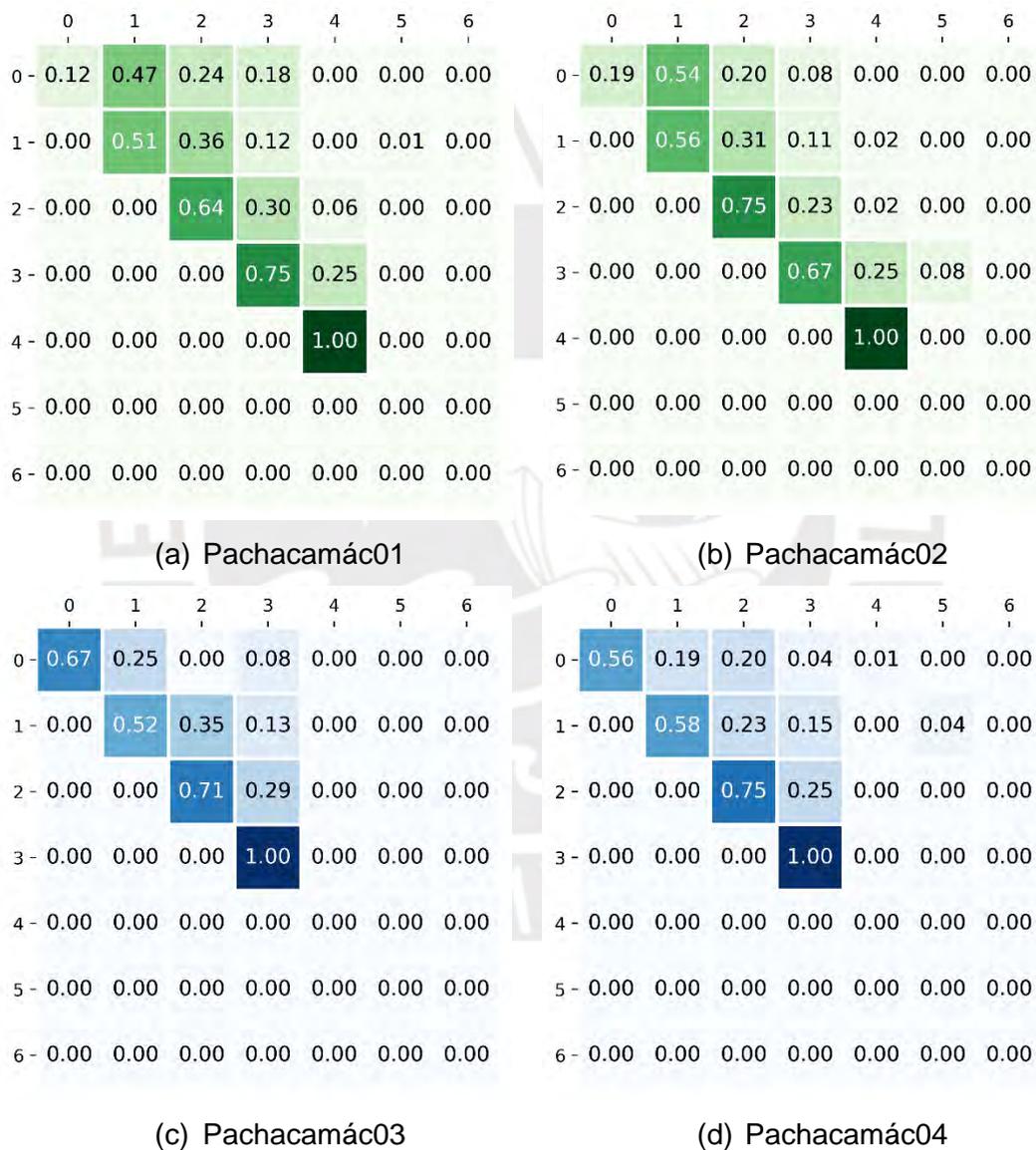
(i) Cieneguilla

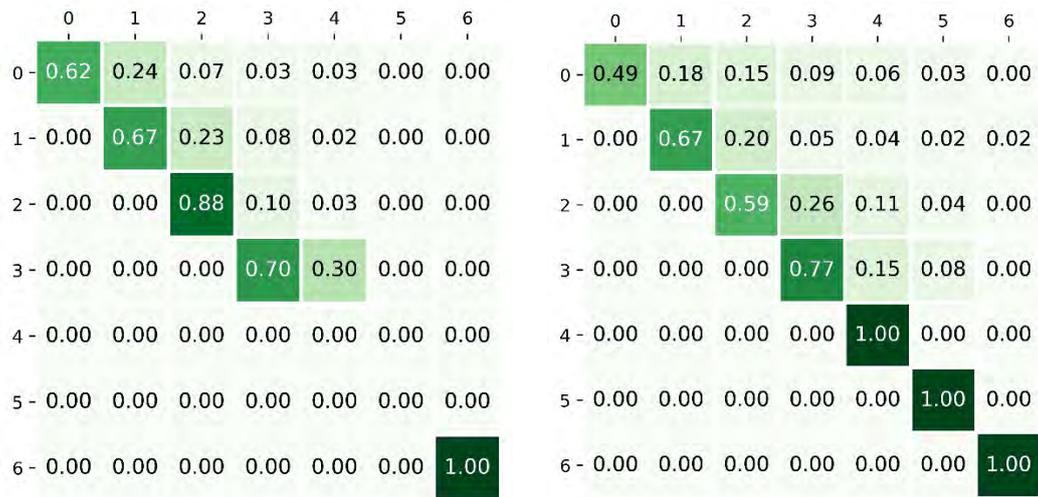
Figura 3.3. Matrices T por década para cada zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Por último, se hallaron, para cada zona, las probabilidades $p_{i,j}$ de que cierta vivienda crezca de i pisos a j pisos considerando la siguiente expresión en función de los valores de las matrices T por década.

$$p_{i,j} = \frac{t_{i,j}}{\sum_{j=0}^6 t_{i,j}} \quad (3.1)$$

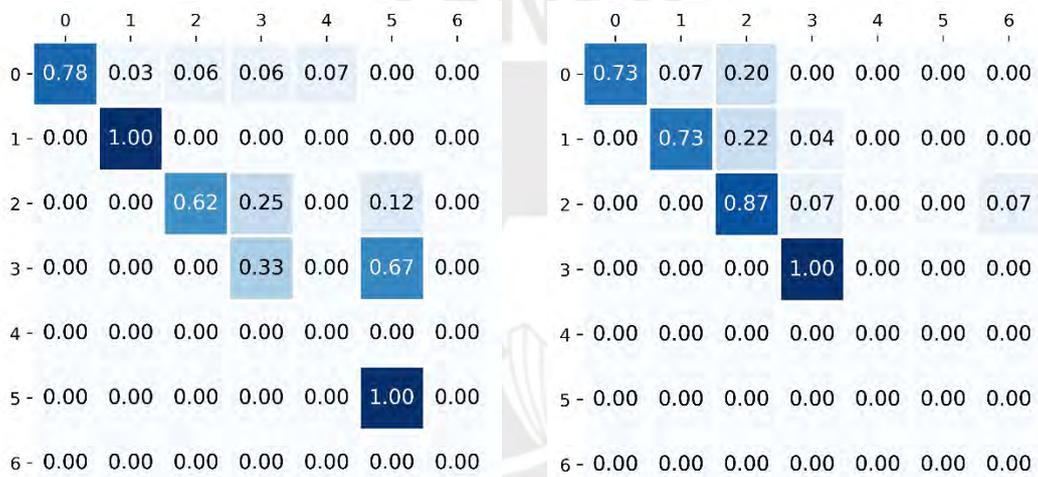
Donde, $t_{i,j}$ representa el número de viviendas cuyo número de pisos creció de i a j pisos y $\sum_{j=0}^6 t_{i,j}$ representa el número de viviendas totales cuyo número de pisos hace una década era de i pisos. Finalmente, con dichas probabilidades, a partir de la expresión numérica 2.1, se armó la matriz P para cada zona evaluada, las cuales se muestran en la figura 3.4.





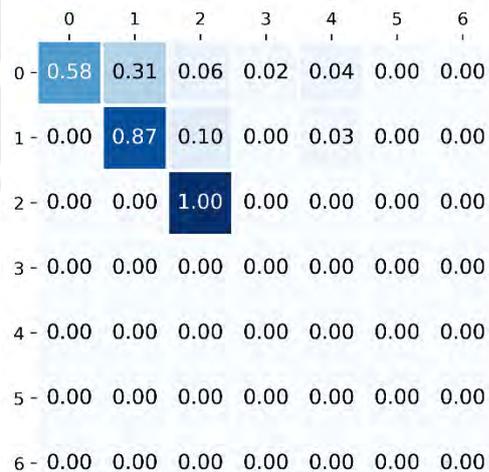
(e) Pachacamác05

(f) Carabayllo01



(g) Carabayllo02

(h) Ate



(i) Cieneguilla

Figura 3.4. Matrices P para cada zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4: Vulnerabilidad Sísmica Actual de las Zonas a Pronosticar

4.1. Datos y áreas de estudio

Se escogieron tres zonas representativas de la parte norte, centro y este de Lima Metropolitana. A continuación, se muestra la ubicación por distrito de las zonas escogidas (Figura 4.1).

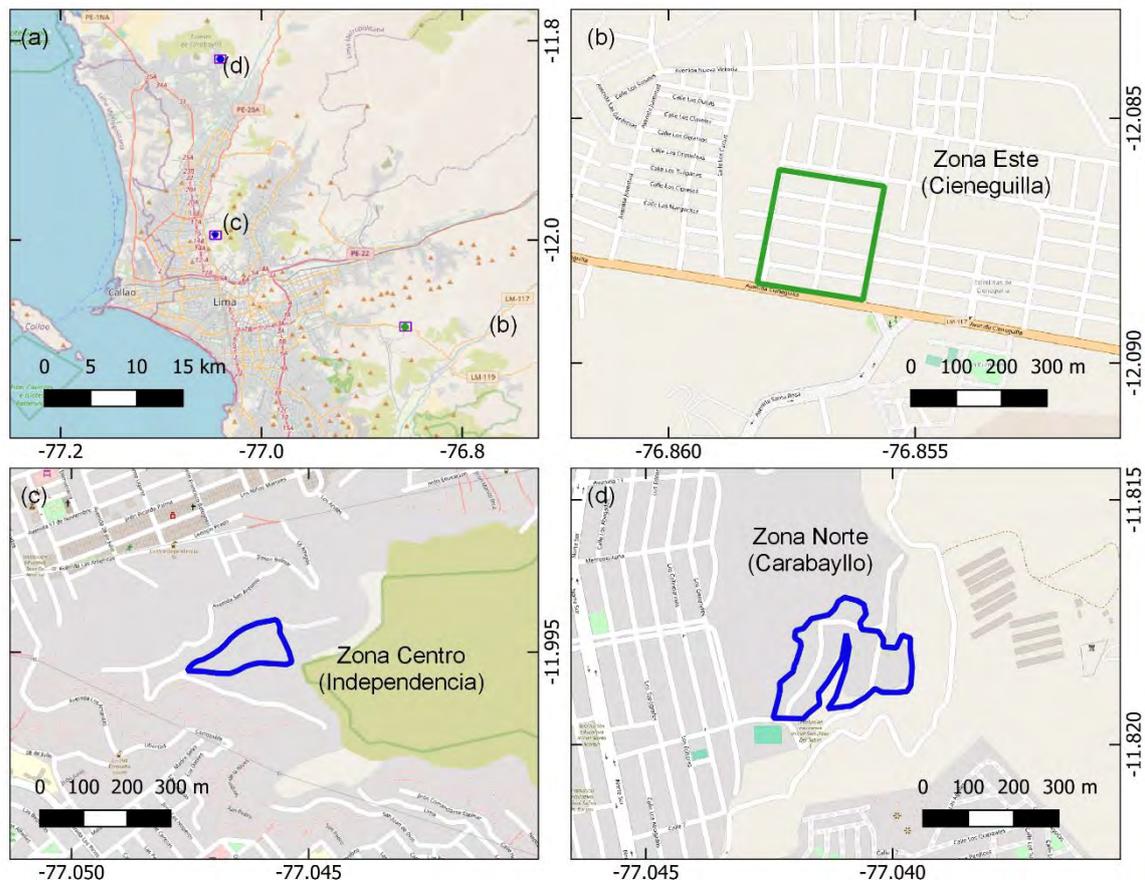


Figura 4.1. Mapa de localización de las zonas a pronosticar. Fuente: Elaboración propia.

(a) Ubicación de las zonas a pronosticar a nivel de Lima Metropolitana. (b) Zona ubicada en el distrito de Cieneguilla (parte este de Lima) (c) Zona ubicada en el distrito de Carabayllo (parte norte de Lima).

(d) Zona ubicada en el distrito de Independencia (parte centro de Lima)..

Por cada zona, se cuantificó el número de pisos de las viviendas empleando las mismas consideraciones para viviendas de “o pisos” presentadas en el capítulo anterior, y, a su vez, empleando la misma metodología de conteo utilizando imágenes de drones. En la tabla 4.1, se detallan el número de muestras de cada zona.

Tabla 4.1

Número de viviendas con cierta cantidad de pisos por cada zona a pronosticar

Zona	Distrito	Número de muestras	Número de viviendas			
			0 pisos	1 piso	2 pisos	3 pisos
Norte	Carabayllo	130	96	22	10	2
Centro	Independencia	127	104	18	4	1
Este	Cieneguilla	129	105	12	11	1

Nota: Elaboración propia

4.2. Obtención de funciones de fragilidad

A continuación, se evalúa la vulnerabilidad sísmica actual. Para este propósito, calculamos la probabilidad de experimentar un cierto nivel de daño bajo una demanda esperada asociada a un terremoto de magnitud 8.8 en Lima Metropolitana.

$$P[B = b | M_w = 8.8] = \sum_{i=0}^6 d_i \int_0^{\infty} P[B = b_k | A = a \text{ AND } F = i] P[A = a | M_w = 8.8] da \quad (4.1)$$

Donde, B es una variable aleatoria del nivel de daño y b es una realización de B , A es una variable aleatoria de la demanda y a es una realización de A , y $P[X = x | Y]$ es la probabilidad de que $X = x$ condicionada a que ocurra Y . Además, para el análisis del año actual, d se plantea como el vector normalizado \mathbf{d}_0 . Para la probabilidad de daño dado un parámetro de demanda a e i número de pisos, $P[B = b | A = a \text{ AND } F = i]$, se adopta la distribución logarítmica propuesta por Villar-Vega et al. (2017) para edificios de mampostería. La Tabla 4.2 muestra la media logarítmica, λ , y la desviación estándar logarítmica, χ , para las distribuciones lognormales. Desafortunadamente, Villar-Vega et al. (2017) propusieron funciones de daño solo para edificios de mampostería de hasta tres pisos. Por lo tanto, en este estudio, la probabilidad de daño para edificios de mampostería con cuatro o cinco pisos se aproximará a la probabilidad de daño para edificios de tres pisos. Tómese en cuenta que el parámetro de demanda, A , es la aceleración máxima del suelo (PGA) para edificios de mampostería de un piso y la aceleración espectral (SA) a un período de 0.3 segundos para edificios de mampostería de dos y tres pisos.

Tabla 4.2

Parámetros requeridos para determinar la probabilidad de daño en cada vivienda según su tipología

Número de pisos	IM	Estados de daño							
		Ligero		Moderado		Extensivo		Colapso	
		λ	x	λ	x	λ	x	λ	x
1	PGA	-1.418	0.310	-0.709	0.328	-0.496	0.322	-0.231	0.317
2	Sa para 0.3 s	-1.112	0.269	-0.365	0.325	-0.088	0.372	-0.288	0.513
3	Sa para 0.3 s	-1.189	0.338	-0.520	0.447	-0.216	0.501	-0.220	0.685

Nota. Adaptado de "Development of a Fragility Model for the Residential Building Stock in South America" (Villa-Vega et al., 2017).

Tabla 4.3

Vectores d_0 de porcentajes de viviendas de cierto número de pisos

Zona	0 pisos	1 piso	2 pisos	3 pisos	4 pisos	5 pisos	6 pisos
Este	0.81395	0.093	0.08527	0.00775	0	0	0
Centro	0.81898	0.1417	0.0315	0.00787	0	0	0
Norte	0.73846	0.1692	0.07692	0.01538	0	0	0

Nota: Elaboración propia

Para la probabilidad de que $A = a$ en la ubicación del área de estudio durante un terremoto de magnitud 8.8, $P[A = a | M_w = 8.8]$, se utilizaron los 1000 escenarios de terremotos para Lima Metropolitana propuestos por Ceferino et al. (2018). Para cada simulación, se determinaron los valores de PGA y SA más cercanos correspondientes a las coordenadas del área de estudio. Las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 muestran las distribuciones de PGA y SA obtenidas para cada zona a partir de los 1000 escenarios. Utilizando la Ecuación 4.1, se calculó la probabilidad de daño en el área de estudio durante un terremoto de magnitud 8.8 en Lima Metropolitana para el año actual. Se consideran cuatro niveles de daño diferentes: leve, moderado, extenso y colapso.

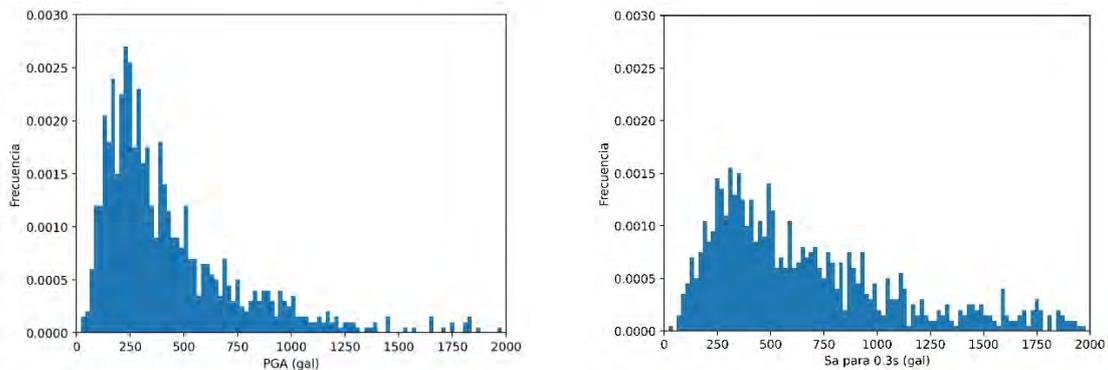


Figura 4.2. Histogramas de (a) PGA y (b) Sa de la zona Este. Fuente: Elaboración propia.

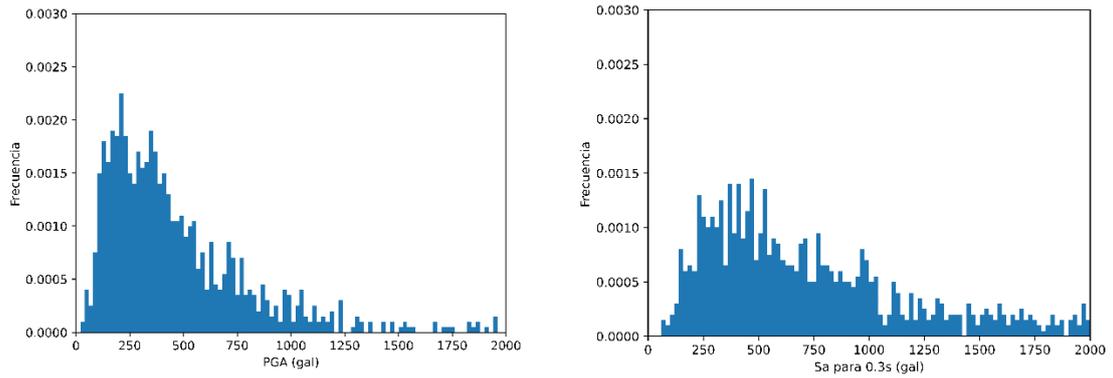


Figura 4.3. Histogramas de (a) PGA y (b) Sa de la zona Centro. Fuente: Elaboración propia.

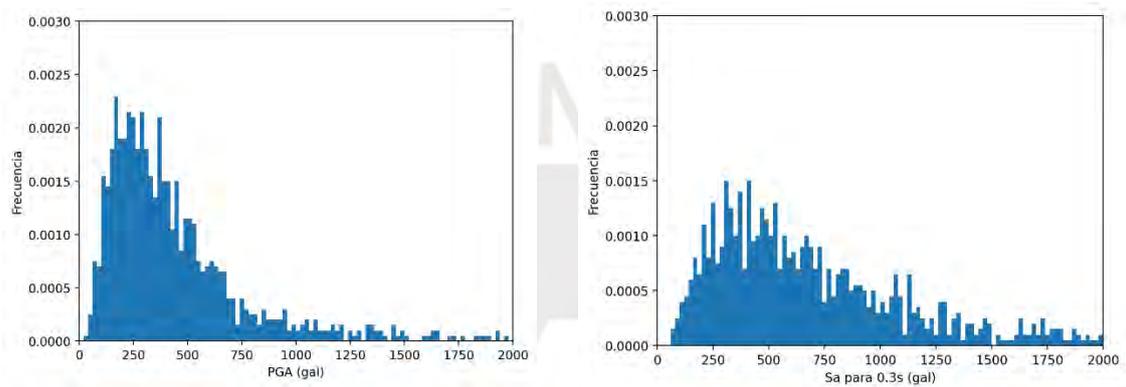
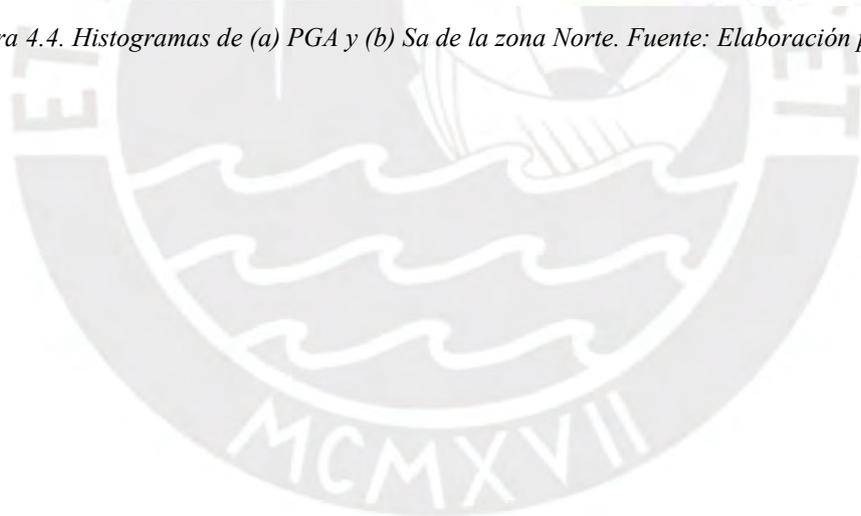


Figura 4.4. Histogramas de (a) PGA y (b) Sa de la zona Norte. Fuente: Elaboración propia.



Capítulo 5: Pronóstico de vulnerabilidad sísmica de la zona escogida

5.1. Pronóstico de crecimiento vertical

Habiendo obtenido las matrices T por década (Figura 3.3), dividimos a las zonas registradas en dos subgrupos: zonas alejadas (color azul) y zonas concurridas (color rojo).

Entonces, para cada subgrupo, con el fin de obtener una matriz representativa del subgrupo se procedió a sumar estas matrices T por década (Figura 5.1)

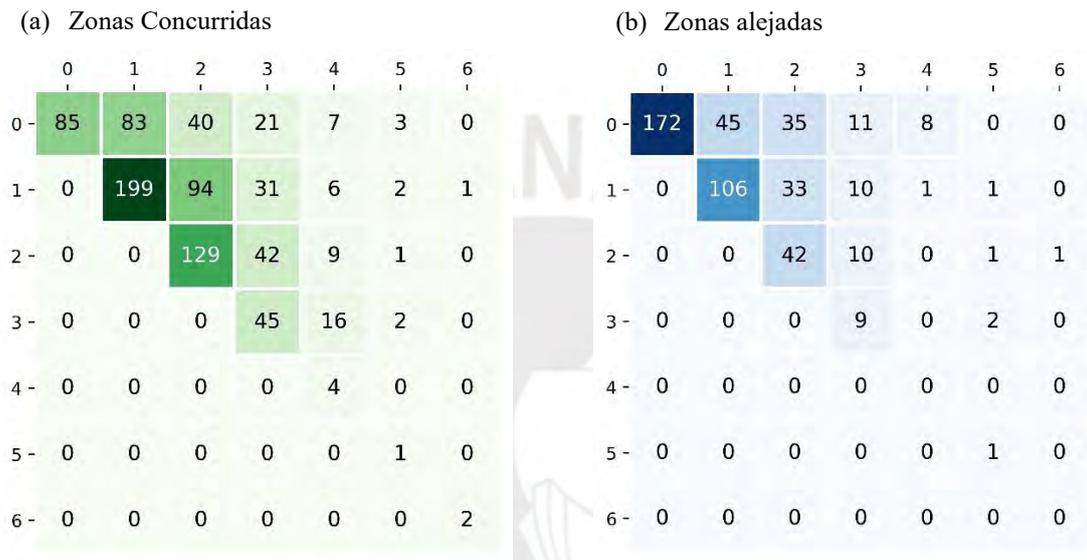


Figura 5.1. Matrices T por década para cada subgrupo. Fuente: Elaboración propia.

A partir de estas matrices, se hallaron las matrices de velocidad de crecimiento vertical (matriz P) para cada subgrupo utilizando la ecuación 3.1 (Figura 5.2).



Figura 5.2. Matrices P para cada subgrupo. Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar que, como las bases de datos registradas, en ciertos casos, no contaban con un cierto número de pisos “x”, se decidió asignarle el valor de 1 en el término correspondiente en la diagonal dentro de la matriz P, ya que de existir viviendas de “x” pisos en la zona a pronosticar se consideraría que en la primera década futura este número se mantiene y en décadas posteriores este es acumulable.

A continuación, considerando que el vector d cambiará con el paso de las décadas, este se obtuvo multiplicando el vector normalizado d_0 por la matriz de velocidad de crecimiento vertical (matriz P), n veces para n décadas de predicción a futuro (Ecuación 5.1).

$$d_n = d_0 \cdot P^n \quad (5.1)$$

Por último, el vector con los pronósticos de crecimiento vertical de cada zona se obtiene multiplicando cada término del vector d (porcentaje de viviendas de cierto número de pisos en “n” décadas a futuro) por el número total de viviendas de la zona. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 5.3, 5.4 y 5.5.

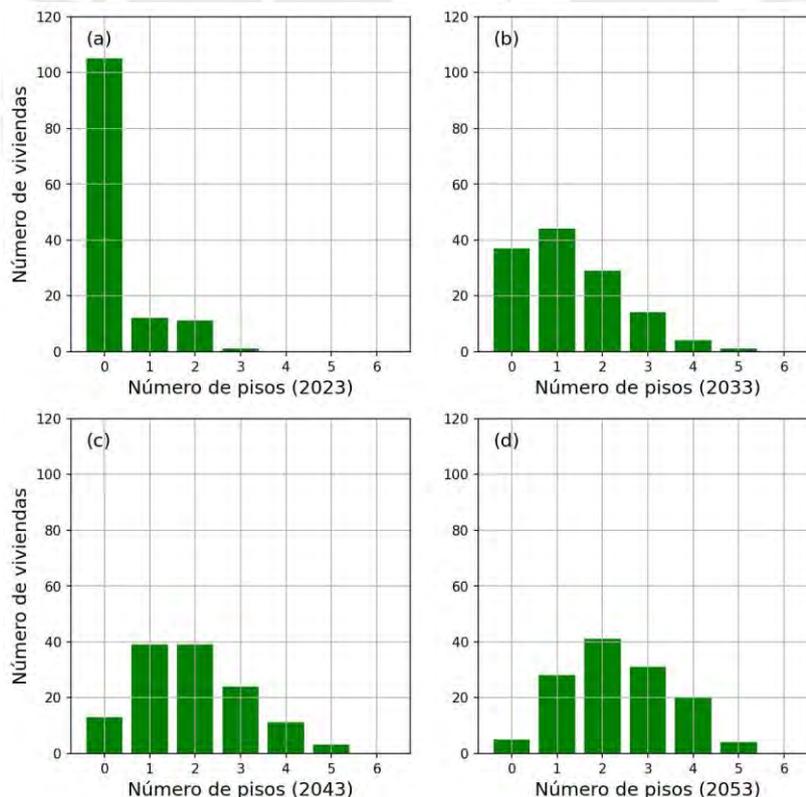


Figura 5.3. Pronóstico de crecimiento vertical de la zona Este para el 2033, 2043 y 2053. Fuente: Elaboración propia.

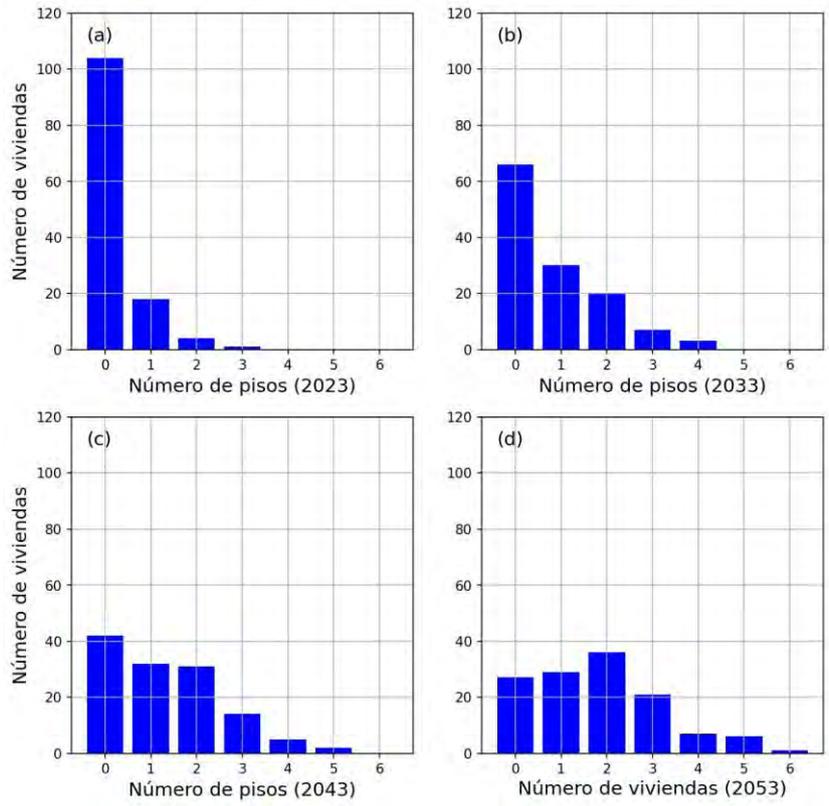


Figura 5.4. Pronóstico de crecimiento vertical de la zona Centro para el 2033, 2043 y 2053. Fuente: Elaboración propia.

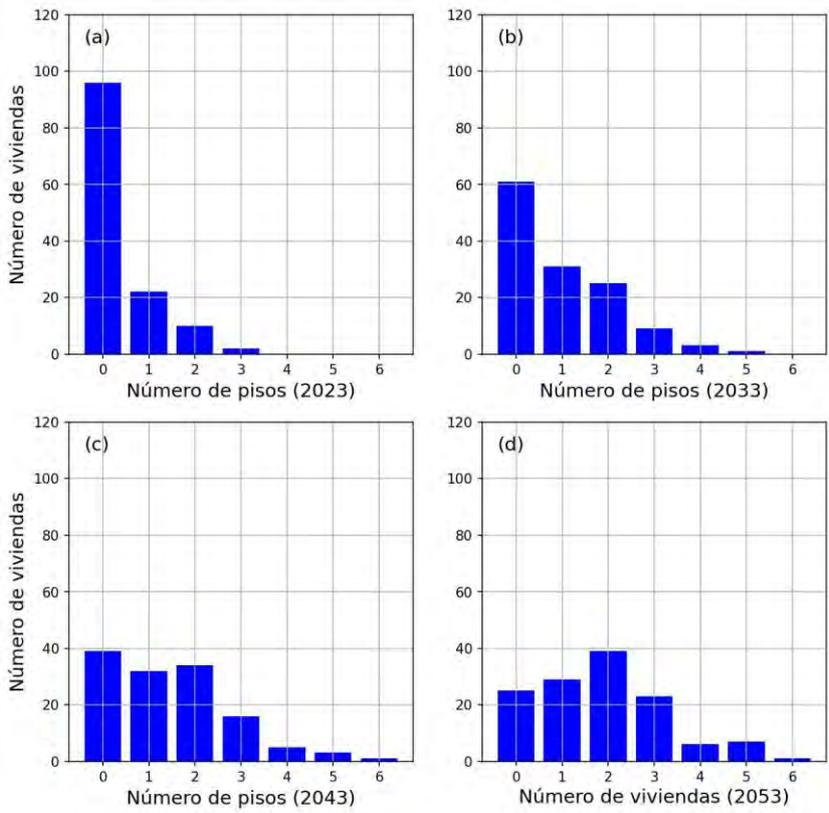


Figura 5.5. Pronóstico de crecimiento vertical de la zona Norte para el 2033, 2043 y 2053. Fuente: Elaboración propia.

Por un lado, se advierte que, en la zona Este, identificada como una región densamente poblada, se registra durante la primera década una significativa transformación en la tipología de viviendas, donde un considerable número ha evolucionado desde edificaciones de un solo nivel hasta alcanzar rápidamente una altura de hasta cinco pisos. Asimismo, se constata un desarrollo constante en las décadas subsiguientes, manifestando así la configuración de una distribución gaussiana que exhibe, en cada periodo decenal, un punto álgido con una consistente presencia de construcciones de dos o tres pisos.

Por otro lado, en las zonas central y oriental, caracterizadas por su carácter más distante y menos concurrido, se percibe una predominancia de viviendas de un solo piso hasta la segunda década del análisis. Esto sugiere un crecimiento más pausado y, simultáneamente, la ausencia de picos característicos o la formación de la distribución gaussiana previamente identificada en la zona Este. Este fenómeno denota una marcada disparidad entre ambas categorías de áreas examinadas.

5.2. Análisis comparativo de vulnerabilidad sísmica actual y futura

Al igual que para el año actual analizado, se hallaron los siguientes valores en los vectores d de porcentaje de viviendas con cierto número de pisos (figura 5.6, figura 5.7 y figura 5.8)

	0	1	2	3	4	5	6
2023 -	0.814	0.093	0.085	0.008	0.000	0.000	0.000
2033 -	0.287	0.341	0.225	0.109	0.031	0.008	0.000
2043 -	0.101	0.302	0.302	0.186	0.085	0.023	0.000
2053 -	0.039	0.217	0.318	0.240	0.155	0.031	0.000

Figura 5.6. Vectores d de la zona Este para el 2033, 2043 y 2053. Fuente: Elaboración propia.

	0	1	2	3	4	5	6
2023 -	0.806	0.140	0.031	0.008	0.000	0.000	0.000
2033 -	0.512	0.233	0.155	0.054	0.023	0.000	0.000
2043 -	0.326	0.248	0.240	0.109	0.039	0.016	0.000
2053 -	0.209	0.225	0.279	0.163	0.054	0.047	0.008

Figura 5.7. Vectores d de la zona Centro para el 2033, 2043 y 2053. Fuente: Elaboración propia.

	0	1	2	3	4	5	6
2023 -	0.744	0.171	0.078	0.016	0.000	0.000	0.000
2033 -	0.473	0.240	0.194	0.070	0.023	0.008	0.000
2043 -	0.302	0.248	0.264	0.124	0.039	0.023	0.008
2053 -	0.194	0.225	0.302	0.178	0.047	0.054	0.008

Figura 5.8. Vectores d de la zona Norte para el 2033, 2043 y 2053. Fuente: Elaboración propia.

Con dichos vectores d , empleando la ecuación 4.1, se calcularon las probabilidades de presentar cierto estado de daño de las viviendas pronosticadas (Figura 5.9).

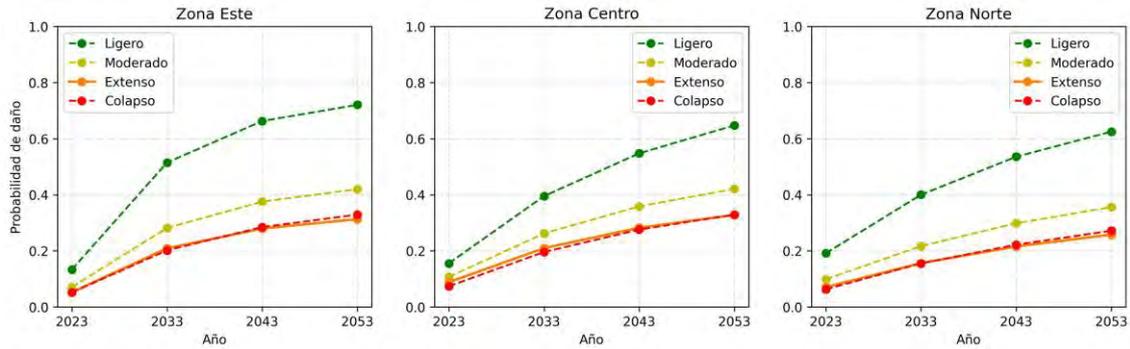


Figura 5.9. Probabilidades de daño de la zona (a) Este, (b) Centro y (c) Norte para el 2033, 2043 y 2053, considerando el crecimiento vertical. Fuente: Elaboración propia.

Se advierte que, para las tres zonas objeto de evaluación, las probabilidades de daño en los cuatro niveles analizados experimentaron un notorio aumento durante la primera década, alcanzando tasas de aproximadamente el 20% de colapso, predominantemente. Asimismo, esta tendencia de crecimiento en las probabilidades persiste en las décadas subsiguientes para las tres zonas; no obstante, exhibe una pendiente menos pronunciada en comparación con la primera década. En lo que respecta al estado de daño leve, se percibe un comportamiento análogo a lo largo de las tres décadas en las tres zonas evaluadas. En contraste, para el estado de colapso, se observan probabilidades más elevadas en la tercera década específicamente en la zona Este.

Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

En esta tesis, se estimó la tasa de crecimiento vertical de los edificios de albañilería en Lima Metropolitana cuantificando el cambio en el número de pisos en una década. Para ello, se utilizaron imágenes de Google Street View registradas en el año 2013 y 2014, según la disponibilidad, además, se utilizaron registros mediante levantamientos de campo en el año 2023 en nueve (9) zonas de estudio en Lima Metropolitana. En total, se registraron 1311 viviendas para este estudio. Con este inventario, se estimó la matriz de crecimiento vertical de cada zona. Dichos resultados, muestran, por un lado, que existe un crecimiento vertical más rápido en las viviendas ubicadas en zonas que tienen flujo vehicular alto por ser zonas altamente transitadas y de mayor actividad comercial. Por otro lado, aquellas viviendas ubicadas en zonas cuya línea de tráfico vehicular es baja, es decir, zonas poco transitadas, presentan crecimientos verticales más lentos. Particularmente, las zonas ubicadas al norte de Lima en el distrito de Carabayllo, presentan las mismas magnitudes de crecimiento que las zonas ubicadas al este de Lima en el distrito de Pachacamac.

Asimismo, se reportó un uso práctico de la matriz de velocidad de crecimiento vertical para predecir la distribución del número de pisos en 10, 20 y 30 años de edificios ubicados en tres (3) asentamientos humanos recientes en Lima. Luego, se evaluó cómo el cambio en la vulnerabilidad, producido por dicho crecimiento vertical, afectó la probabilidad de daño por un terremoto de Mw 8,8 esperado en Lima Metropolitana. Los resultados muestran que los principales aumentos de vulnerabilidad en las tres zonas jóvenes se dan en la primera década para cuatro (4) niveles de daño analizados: ligero, moderado, extensivo y colapso. Además, para las 2 décadas posteriores, persiste aún el aumento de dicha vulnerabilidad sísmica, pero en menor proporción alcanzando probabilidades de colapso de hasta más de 30% de ocurrencia.

Finalmente, es importante resaltar las siguientes recomendaciones. Este estudio utilizó funciones de fragilidad que dependía del número de pisos siendo tres (3) pisos el máximo número disponible; por ello, es necesario continuar las investigaciones con respecto a curvas de fragilidad para viviendas de albañilería informal con más de tres pisos. Ello permitiría obtener resultados más precisos sobre el crecimiento vertical de estas viviendas. Adicionalmente, se recomienda expandir las áreas de estudio aprovechando la disponibilidad de imágenes desde el 2013 en Google Street View de

toda Lima Metropolitana, ya que, debido a limitaciones de recursos en esta investigación, solo se lograron evaluar nueve (9) zonas y, a su vez, pronosticar otras tres (3).



Referencias

- Agresti, A. (2012). *Categorical data analysis* (Vol. 792). John Wiley & Sons.
- Bocquier, P. (2005). World Urbanization Prospects: an alternative to the UN model of projection compatible with the mobility transition theory. *Demographic Research*, 12, 197-236. JSTOR.
- Capeco. (2018). *Formalidad de la construcción. Informe técnico*. Cámara Peruana de la Construcción.
- Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avouac, J. P., Remy, D., Nocquet, J. M., ... & Bonvalot, S. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B12).
- Cockburn, J. C. (2020). ¡Y llegó el bicentenario! Ciudad, clase social y vivienda en Lima (1821-2020). *Revista de Sociología*, (30), 61-82.
- Duhalde, J. (2014). *Asentamientos informales: la marca de la desigualdad urbana en América Latina*. Ciudades Sostenibles.
- Lallemant, D., Burton, H., Ceferino, L., Bullock, Z., & Kiremidjian, A. (2017). A framework and case study for earthquake vulnerability assessment of incrementally expanding buildings. *Earthquake spectra*, 33(4), 1369-1384.
- Naciones Unidas. (2005). *Perspectivas de Urbanización Mundial: La Revisión de 2005*, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, Naciones Unidas, Nueva York.
- Novelli, V. I., De Risi, R., Ngoma, I., Kafodya, I., Kloukinas, P., Macdonald, J., & Goda, K. (2021). Fragility curves for non-engineered masonry buildings in developing countries derived from real data based on structural surveys and laboratory tests. *Soft Computing*, 25, 6113-6138.
- Pérez, R., Carballal, A., Rabuñal, J. R., García-Vidaurrázaga, M. D., & Mures, O. A. (2019). Using AI to simulate urban vertical growth. *CTBUH J*, (III).
- Porter, K., Kennedy, R., & Bachman, R. (2007). Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering. *Earthquake spectra*, 23(2), 471-489.

- Porter, K. (2015). A beginner's guide to fragility, vulnerability, and risk. *Encyclopedia of earthquake engineering*, 2015, 235-260.
- Pulido, N., Aguilar, Z., Tavera, H., Chlieh, M., Calderón, D., Sekiguchi, T., Nakai, S. & Yamazaki, F. (2015). Scenario source models and strong ground motion for future mega-earthquakes: Application to Lima, Central Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 368-386.
- Rabonza, M. L., & Lallemand, D. (2019, May). Accounting for time and state-dependent vulnerability of structural systems. In *13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering* (pp. 2298-2305).
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C., Ordaz, M., Zevallos, A., & Ishizawa, O. (2014). *Seismic Hazard Evaluation in Peru*. Informe técnico. Instituto Geofísico del Perú.
- Tavera, H. (2020). *Análisis y evaluación de los patrones de sismicidad y escenarios sísmicos en el borde occidental del Perú*. Informe técnico. Instituto Geofísico del Perú.
- Vega Centeno, P., Dammert, M., Moschella, P., Vilela, M., Bensús, V., Fernández de Córdova, G., & Pereyra, O. (2019). *Las centralidades de Lima Metropolitana en el siglo XXI*. Fondo Editorial PUCP, Lima.
- Villar-Vega, M., Silva, V., Crowley, H., Yepes, C., Tarque, N., Acevedo, A. B., ... & María, H. S. (2017). Development of a fragility model for the residential building stock in South America. *Earthquake Spectra*, 33(2), 581-604.
- Yauri, S. (2017). *Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8 Mw*. Lima: Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI).