



## ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL ANTE PELIGRO SISMICO EN LAS  
VIVIENDAS EN LA ZONA X DE HUAYCAN, DISTRITO ATE-VITARTE, 2023

**Línea de investigación:**

**Construcción sostenible y sostenibilidad ambiental del territorio**

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería Civil

### **Autor**

Arriola Prieto, Cesar Teodoro

### **Asesor**

Paz Fernandez, Rodolfo Jesus

ORCID: 0000-0002-6533-3741

Aroquipa Velasquez, Hector

ORCID: 0000-0002-6502-5618

### **Jurado**

Cancho Zuñiga, Gerardo Enrique

Defilippi Shinzato, Teresa Milagros

García Urrutia Olavarria, Roque Jesús Leonardo

**Lima - Perú**

**2025**



# VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL ANTE PELIGRO SISMICO EN LAS VIVIENDAS EN LA ZONA X DE HUAYCAN, DISTRITO ATE-VITARTE, 2023

## INFORME DE ORIGINALIDAD

30%

INDICE DE SIMILITUD

29%

FUENTES DE INTERNET

14%

PUBLICACIONES

10%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://fondoeditorial.unat.edu.pe">fondoeditorial.unat.edu.pe</a> Fuente de Internet	18%
2	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	4%
3	<a href="http://repositorio.unc.edu.pe">repositorio.unc.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="http://repositorio.ucv.edu.pe">repositorio.ucv.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
5	<a href="http://upcommons.upc.edu">upcommons.upc.edu</a> Fuente de Internet	<1%
6	<a href="http://repositorio.utea.edu.pe">repositorio.utea.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
7	<a href="http://repositorio.upt.edu.pe">repositorio.upt.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="http://repositorio.unfv.edu.pe">repositorio.unfv.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POS GRADO

VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL ANTE PELIGRO SISMICO EN LAS  
VIVIENDAS EN LA ZONA X DE HUAYCAN, DISTRITO ATE-VITARTE,  
2023

Línea de Investigación:

Construcción sostenible y sostenibilidad ambiental del territorio  
Tesis Para optar el grado académico de Doctor En Ingeniería Civil

Autor:

Arriola Prieto, Cesar Teodoro

Asesor:

Paz Fernandez, Rodolfo Jesus  
(ORCID: 0000-0002-6533-3741)

Aroquipa Velasquez, Hector  
(ORCID: 0000-0002-6502-5618)

Jurado:

Cancho Zuñiga, Gerardo Enrique  
Defilippi Shinzato, Teresa Milagros  
García Urrutia Olavarria, Roque Jesús Leonardo

Lima – Perú

2024

## DEDICATORIA

La presente a mi amada esposa Elena, y a mis queridos hijos Alonso y Jimena, por su amor incondicional y su constante apoyo, que son la fuente de mi inspiración y fortaleza

## AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis asesores, el Dr. Rodolfo Paz Fernández, por su invaluable orientación y sabiduría a lo largo de este proceso, por su apoyo constante y por compartir sus conocimientos y experiencias de manera generosa. También agradezco al Dr. Hector Aroquipa Velásquez, por su valiosa colaboración y por enriquecer este trabajo con su experiencia y dedicación

## ÍNDICE

RESUMEN .....	XIV
ABSTRACT .....	XV
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Planteamiento del Problema .....	1
1.2. Descripción del problema .....	5
1.3. Formulación del problema .....	7
1.3.1. Problema General .....	7
1.3.2. Problemas Específicos .....	7
1.4. Antecedentes .....	7
1.4.1. Internacionales .....	7
1.4.2. Nacionales.....	12
1.5. Justificación de la investigación .....	17
1.5.1. Justificación Teórica.....	17
1.5.2. Justificación Metodológica.....	17
1.5.3. Justificación Práctica.....	18
1.5.4. Justificación Social.....	19
1.5.5. Importancia de la Investigación.....	20
1.5.6. Fundamento.....	21
1.6. Limitaciones de la Investigación .....	22
1.6.1. Espacial.....	22
1.6.2. Temporal.....	22
1.7. Objetivos de la Investigación.....	23
1.7.1. Objetivo General.....	23
1.7.2. Objetivos Específicos .....	23
1.8. Hipótesis.....	23
1.8.1. Hipótesis Principal.....	23
1.8.2. Hipótesis Secundarias.....	23
II. MARCO TEÓRICO .....	25

2.1. Base teórica.....	25
2.1.1. Autoconstrucción .....	25
2.1.2. Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico.....	34
2.1.3. Daños físicos en Sistemas Estructurales .....	39
2.1.4. Acción Sísmica para el Análisis de Respuesta Dinámica.....	41
2.1.5. Curva analítica de Vulnerabilidad / Fragilidad.....	49
2.1.6. Resiliencia Sísmica y las Pérdidas Económicas.....	50
2.1.7. Curvas de Fragilidad Estructural y Resiliencia.....	60
2.2. Base filosófica.....	72
2.2.1. Amenaza Sísmica Probabilista para Resiliencia de viviendas autoconstruidos .....	72
2.2.2. Vulnerabilidad Sísmica: Estado del arte retrospectiva y prospectiva.....	73
2.2.3. Resiliencia Sísmica en Sistemas Estructurales.....	75
2.2.4. Un marco Filosófico Conceptual para Resiliencia.....	76
2.3. Base conceptual extendida.....	79
2.3.1. Métodos de Análisis y Aspectos Conceptuales.....	79
2.3.2. Respuesta Dinámica de Sistemas Estructurales .....	84
2.3.3. Riesgo Sísmico .....	85
2.3.4. Evaluación del daño sísmico .....	87
2.3.5. Evaluación del Desempeño Sísmico .....	89
2.3.6. Carga Sísmica.....	92
2.3.7. El Análisis Dinámico Incremental.....	94
2.3.8. Matriz de Probabilidad de Daño .....	96
2.3.9. Resiliencia Sísmica de Sistemas Estructurales.....	97
2.4. Base tecnológica.....	97
III. MÉTODO.....	100
3.1. Tipo de investigación .....	100
3.1.1. Tipo.....	100
3.1.2. Nivel .....	101
3.1.3. Códigos y Nomenclaturas UNESCO .....	101
3.1.4. Diseño de la investigación.....	102

3.2. Población y muestra.....	103
3.2.1. Población .....	103
3.2.2. Tamaño de la Muestra .....	103
3.2.3. Muestreo .....	104
3.3. Operacionalización de variables.....	104
3.3.1. Estrategia de Prueba de Hipótesis .....	104
3.3.2. Variables e Indicadores .....	108
3.4. Técnicas e Instrumentos.....	111
3.4.1. Técnicas de Procesamiento de Datos.....	111
3.4.2. Técnicas de Análisis e Interpretación de la Información.....	111
3.4.3. Instrumentos de Recolección de Datos según la Metodología .....	113
3.4.4. Validación de los Instrumentos .....	115
3.5. Procedimientos .....	118
3.5.1. Procesamiento de Datos .....	118
3.5.2. Análisis e Interpretación de la Información .....	119
3.5.3. Recolección de Datos según la Metodología .....	119
3.5.4. Validación de los Instrumentos .....	120
3.6. Análisis de datos.....	120
3.7. Consideraciones éticas.....	121
IV. RESULTADOS.....	125
4.1. Introducción .....	125
4.1.1. Caracterización de los edificios autoconstruidos – viviendas .....	126
4.1.2. Determinación de los índices de Resiliencia sísmica .....	150
4.1.3. Análisis matemático para la obtención de los índices de resiliencia sísmica.....	157
4.1.4. Función de distribución acumulada.....	173
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	184
VI. CONCLUSIONES .....	186
6.1. Resiliencia sísmica insuficiente en viviendas autoconstruidas .....	186
6.2. Alta vulnerabilidad estructural ante sismos moderados y severos .....	186
6.3. Metodología de evaluación replicable y rigurosa .....	186

6.4. Índice de resiliencia sísmica diferenciado por número de niveles .....	186
6.5. Conclusión general del problema y objetivos .....	187
6.6. Conclusiones por Objetivos Específicos .....	187
6.7. Significancia de la Investigación .....	188
VII. RECOMENDACIONES .....	189
7.1. Investigación y Comparación Internacional .....	189
7.2. Educación, Tecnología y Modelos Predictivos .....	189
7.3. Recomendaciones específicas para mejorar la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas.....	190
VIII. REFERENCIAS.....	192
IX. ANEXOS .....	217

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Procesos constructivos de viviendas autoconstruidas.....	27
Figura 2. Deficiencias relevantes en los sistemas autoconstruidos .....	31
Figura 3. Factor de daño de sistemas estructurales.....	38
Figura 4. Ejemplo típico de funciones de fragilidad .....	41
Figura 5. Diagrama - proceso de análisis no lineal .....	46
Figura 6. Resiliencia sísmica - tiempo de recuperación <i>TRE</i> .....	53
Figura 7. Funciones de recuperación .....	54
Figura 8. Resiliencia y los efectos de los agentes a largo plazo .....	55
Figura 9. Representación esquemática del concepto de rapidez.....	55
Figura 10. La influencia del ingenio en la resiliencia .....	57
Figura 11. La influencia del ingenio en la resiliencia .....	60
Figura 12. Efectos de un evento con intensidad <i>II</i> sobre la curva de fragilidad.....	63
Figura 13. Ingenio y la fase de recuperación en la curva de fragilidad .....	65
Figura 14. Los espectros de diseño de Los Ángeles.....	66
Figura 15. Curvas de Análisis dinámico Incremental IDA.....	66
Figura 16. Curvas de fragilidad para diferentes condiciones .....	68
Figura 17. Curvas de vulnerabilidad para diferentes condiciones .....	69
Figura 18. Curvas de funcionalidad para cuatro niveles de peligro sísmico .....	71
Figura 19. Espectro de capacidad y demanda .....	82
Figura 20. Representación bilineal de la curva de capacidad .....	84

Figura 21. Modelo constitutivo elasto-plástico .....	90
Figura 22. Curvas de capacidad con varios patrones de carga .....	91
Figura 23. Modos de vibración a partir del modelo estructural .....	91
Figura 24. Modo fundamental de MDOF a un SDOF .....	92
Figura 25. Espectro de capacidad obtenido a partir de la curva de capacidad .....	92
Figura 26. Relación entre el PGA y el desplazamiento en el techo.....	95
Figura 27. Relación entre el cortante máximo y el desplazamiento máximo.....	95
Figura 28. Ejemplo de índice de daño para diferentes condiciones.....	96
Figura 29. Viviendas típicas en los distritos de Los Olivos, San Juan de Lurigancho, Pueblo Libre y Breña .....	127
Figura 30. Antigüedad de las viviendas.....	128
Figura 31. Con dirección técnica y sin dirección técnica, a) etapa de proyecto, y b) etapa de ejecución .....	130
Figura 32. Antigüedad de las viviendas.....	132
Figura 33. Etapas de construcción de las viviendas autoconstruidas (encuestados solo viviendas concluidas) .....	134
Figura 34. Resistencia a la compresión de viviendas autoconstruidas (para este caso se involucraron viviendas donde sus elementos estructurales aún se encontraron expuestas).....	135
Figura 35. Resistencia a la compresión del concreto. a) Variabilidad normalizado,.....	137
Figura 36. probabilidad normal que evalúan la distribución de la resistencia a la compresión del concreto en columnas, vigas y losas.....	139

Figura 37. probabilidad normal que evalúan la distribución de la resistencia a la compresión del concreto en columnas, vigas y losas.....	141
Figura 38. probabilidad normal que evalúan la distribución de la resistencia a la compresión del concreto en columnas, vigas y losas.....	144
Figura 39. Patología en viviendas autoconstruidas.....	149
Figura 40. Vulnerabilidad, Peligro, Riesgo y Resiliencia sísmica.....	156
Figura 41. Espectro de respuesta elástico $\xi = 5\%$ , (a) Grupo 1 para el tipo S2 del suelo y (b) Grupo 2 para el tipo S3 del suelo.....	159
Figura 42. Orientación de los componentes rígidos y flexibles, de los sistemas híbridos en la autoconstrucción de viviendas.....	161
Figura 43. Edificios de vivienda analizados, (a) 2, (b) 4 y (c) 6 niveles, en su lado flexible (sistema aporticado).....	162
Figura 44. Derivas de piso para las viviendas de 2, 4 y 6 pisos .....	163
Figura 45. Análisis de desempeño “Pushover” de 2, 4 y 6 pisos de viviendas autoconstruidas. ....	165
Figura 46. Análisis de desempeño “Pushover” de 2, 4 y 6 pisos y conversión Bilineal.....	166
Figura 47. Análisis IDA para la edificación de la vivienda autoconstruida de 2 pisos.....	167
Figura 48. Análisis IDA para la edificación de la vivienda autoconstruida de 4 pisos.....	168
Figura 49. Análisis IDA para la edificación de la vivienda autoconstruida de 6 pisos.....	172
<b>Figura 50.</b> <i>Curvas de función de distribución de probabilidad acumulada para cada aceleración considerada, para los 22 registros sísmicos para el modelo representativo 2, 4 y 6 niveles .....</i>	174

<b>Figura 51. Curvas de fragilidad para los modelos de 2, 4 y 6 niveles .....</b>	<b>175</b>
Figura 52. Funciones de Vulnerabilidad para las viviendas de 2, 4 y 6 pisos.....	179
Figura 53. Funciones de Vulnerabilidad para las viviendas de 2, 4 y 6 pisos. Según daños originales, suavizados y varianza .....	180
Figura 54. Función de resiliencia viviendas autoconstruidas de 2, 4 y 6 pisos. Según daños originales.....	182

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características más relevantes de la vulnerabilidad de la autoconstrucción.....	30
Tabla 2. Problemas estructurales que conlleva la autoconstrucción .....	32
Tabla 3. Índices de detección in-situ (método turco).....	37
Tabla 4. Clases de construcción de mampostería y peso relativo de cada parámetro .....	39
Tabla 5. Niveles de daño según el índice de Park.....	40
Tabla 6. Métodos de pushover modificados y sus propósitos.....	43
Tabla 7. Resumen de estudios previos sobre (NLTHA) - (IDA).....	47
Tabla 8. Estados de daño y variedad de factores de daño.....	52
Tabla 9. Especificaciones de los sismos evaluados.....	67
Tabla 10. Valores de deriva de 4 niveles de daño de componentes estructurales .....	68
Tabla 11. Desviaciones promedio - niveles de daño - no estructural (derivas).....	69
Tabla 12. Desviaciones promedio - niveles de daño - no estructural (aceleración) .....	69
Tabla 13. Valores de pérdidas directas para sismos de epicentros cercano.....	70
Tabla 14. Valores de pérdidas directas para sismos de epicentros lejano .....	70
Tabla 15. Valores del tiempo de recuperación según diferentes niveles de peligro.....	71
Tabla 16. Valores de resiliencia para diferentes niveles de peligro – cercanos .....	72
Tabla 17. Valores de resiliencia para diferentes niveles de peligro – Lejano .....	72
Tabla 18. Rangos del índice de daño de Park y Ang .....	88
Tabla 19. Rangos del índice de Bracci para los diferentes estados de daño.....	88
Tabla 20. Límites del índice de Calvi para los estados de daño - mampostería .....	89

Tabla 21. Variables e indicadores – Operacionalización de variables: Análisis cuantitativa	109
Tabla 22. Variables e indicadores – Operacionalización de variables – Análisis cualitativa	110
Tabla 23. Índice de correlación entre elementos estructurales.....	142
Tabla 24. Estadística de la resistencia a la compresión del concreto en columnas, vigas y columnas.....	145
Tabla 25. Escala de vulnerabilidad Benedetti-Petrini para edificaciones albañilería.....	151
Tabla 26. Estos 11 parámetros de adaptaron para el caso de estudio, que se describe a continuación.....	151
Tabla 27. Resultados del Iv por vivienda con porcentaje para asignación de vulnerabilidad, Peligro, Riesgo y índice de resiliencia.....	155
Tabla 28. Probabilidad de excedencia y ocurrencia para una intensidad sísmica de 0.45g para. ....	176
Tabla 29. índice de resiliencia.....	183

## RESUMEN

El estudio titulado "Vulnerabilidad Estructural ante Peligro Sísmico en las Viviendas en la Zona X de Huaycán, Distrito Ate-Vitarte, 2023" tiene como **objetivo:** evaluar el grado de vulnerabilidad sísmica de las viviendas autoconstruidas en una región propensa a terremotos. **Método:** incluye la evaluación de edificaciones de 2, 4 y 5 niveles mediante pruebas de resistencia a la compresión del concreto, que revelaron que los valores estaban un 30% por debajo de los estándares establecidos en la normativa E030. Adicionalmente, se utilizaron técnicas de modelado y simulación para realizar análisis de respuesta sísmica, incluyendo pruebas dinámicas incrementales que permitieron identificar la probabilidad de colapso en estas estructuras. **Resultados:** indicaron que las estructuras de 4 y 6 niveles presentan un riesgo significativamente mayor de daño severo o colapso, con una tasa de colapso estimada en un 20.5% bajo condiciones sísmicas extremas. Asimismo, se desarrollaron curvas de fragilidad que evidencian que las viviendas más antiguas y aquellas construidas sin supervisión técnica adecuada tienen un 45% más de probabilidad de fallar estructuralmente en comparación con las viviendas construidas con supervisión técnica. **Conclusión:** la investigación destaca la necesidad urgente de implementar estrategias de refuerzo y propone un índice de resiliencia sísmica para cuantificar la capacidad de las viviendas autoconstruidas de resistir terremotos de distintas intensidades. Este índice no solo permite una evaluación continua de la resiliencia estructural, sino que también sirve como una herramienta clave para la mejora de las prácticas de construcción en zonas sísmicamente vulnerables.

**Palabras clave:** Resiliencia sísmica, viviendas autoconstruidas, vulnerabilidad sísmica, desempeño sísmico, calidad constructiva.

## ABSTRACT

The study titled "Structural Vulnerability to Seismic Hazards in Housing in Zone X of Huaycán, Ate-Vitarte District, 2023" has the **objective:** of evaluating the degree of seismic vulnerability of self-built homes in an earthquake-prone region. **Method:** This includes the evaluation of 2-, 4-, and 6-story buildings through concrete compression strength tests, which revealed that the values were 30% below the standards established by the E030 code. Additionally, modeling and simulation techniques were used to conduct seismic response analyses, including incremental dynamic tests that helped identify the likelihood of collapse in these structures. **Results:** The study indicated that 4- and 6-story structures present a significantly higher risk of severe damage or collapse, with an estimated collapse rate of 20.5% under extreme seismic conditions. Furthermore, fragility curves were developed, showing that older homes and those built without proper technical supervision are 45% more likely to experience structural failure compared to homes constructed with adequate supervision. **In conclusion:** The research highlights the urgent need to implement reinforcement strategies and proposes a seismic resilience index to quantify the ability of self-built homes to withstand earthquakes of varying intensities. This index not only allows for continuous assessment of structural resilience but also serves as a key tool for improving construction practices in seismically vulnerable areas.

**Keywords:** Seismic resilience, self-built housing, seismic vulnerability, seismic performance, construction quality.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Planteamiento del Problema

Entre los desastres naturales, los sismos se destacan como uno de los eventos más destructivos. La considerable pérdida de vidas y la devastación de infraestructuras humanas evidencian la destrucción que pueden causar estos fenómenos y resaltan la debilidad de las construcciones humanas. Por ello, el análisis del comportamiento estructural frente a movimientos telúricos es un objetivo permanente en la ingeniería sísmica (Dumova, 2000). Así, Alas & Grijalva (2018) señalan que "la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de una edificación, un conjunto de ellas o de un portafolio, es vista como la propensión natural a sufrir daños durante un terremoto, relacionándose directamente con sus atributos de diseño estructural".

En Lima, la autoconstrucción ha generado asentamientos que reflejan una solución común ante la falta de viviendas accesibles y la limitación de recursos económicos. Esta modalidad de vivienda social informal, aunque proporciona un alivio inmediato para la necesidad de alojamiento, genera graves preocupaciones sobre la seguridad estructural y la resistencia a terremotos. Estas edificaciones suelen construirse sin seguir los códigos de construcción actuales, especialmente en lo que se refiere a la albañilería confinada, resultando en estructuras con alta susceptibilidad a daños sísmicos. Este aspecto constituye un significativo riesgo en una región propensa a eventos sísmicos. Asimismo, El proceso de autoconstrucción en Lima frecuentemente implica la utilización de materiales de construcción de calidad inferior y la ausencia de supervisión técnica profesional. Esta combinación resulta en múltiples defectos constructivos que comprometen no solo la integridad física de las estructuras sino también la seguridad de sus ocupantes. Estudios preliminares indican que la

resistencia mecánica de los materiales empleados es inferior a los estándares mínimos nacionales, incrementando su vulnerabilidad ante daños durante y después de sismos.

Las mejoras en el diseño estructural tienden a aplicarse principalmente a nuevas construcciones, mientras que la rehabilitación de estructuras existentes recibe menor atención (Aroquipa, 2016; Aroquipa & Hurtado, 2022; Moreno González, 2006a). Sin embargo, el número de estructuras ya existentes supera significativamente al de nuevas edificaciones (Vargas et al., 2013). Por lo tanto, para reducir las pérdidas causadas por terremotos, es igualmente esencial mejorar el desempeño de las estructuras antiguas mediante refuerzos adaptados a cada tipo de sistema estructural. Este proceso requiere una evaluación previa del comportamiento sísmico esperado y del tiempo de recuperación, lo que forma la base para estudios de resiliencia sísmica (Moreno González, 2006a). Estos estudios están dirigidos a predecir posibles daños en estructuras ante un sismo de determinada magnitud, permitiendo definir estrategias para disminuir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia, basadas en la funcionalidad del sistema estructural y las pérdidas esperadas, es decir, el riesgo sísmico (Yépez et al., 1996).

Durante los últimos 40 años, se han propuesto diversas investigaciones que abordan la vulnerabilidad sísmica de distintos sistemas estructurales, tanto existentes como nuevos (Shamsoddini Motlagh et al., 2020). Sin embargo, estas investigaciones aún no han definido con precisión el grado de recuperación o funcionalidad de un sistema estructural. Numerosas metodologías han sido desarrolladas para evaluar la vulnerabilidad sísmica, con diferentes niveles de detalle y aplicabilidad global, especialmente en zonas de alta sismicidad, como lo demuestran estudios realizados por (Aroquipa et al., 2017; Barbat et al., 1998, 2016; Dumova Jovanoska, 2000; Eleftheriadou et al., 2014; Hwang & Huo, 1994; Krawinkler & Seneviratna, 1998; Salgado-Gálvez et al., 2015; Singhal, 1996; Vargas et al., 2013; Yamin et al., 2014, 2017), entre otros. No obstante, en países en desarrollo y aquellos con normativas de diseño

sísmico deficientes, se ha avanzado poco en la reducción de la vulnerabilidad de las estructuras existentes y en la cuantificación del grado de daño y recuperación de los sistemas estructurales como medida de resiliencia ante sismos de moderada a alta intensidad.

Las pérdidas humanas y los daños físicos, sociales y económicos han dado lugar a verdaderas catástrofes sísmicas, como las que ocurrieron recientemente en Ecuador (16 de abril de 2016), Chile (27 de febrero de 2010) y México (19 de septiembre de 2017). Vargas et al. (2013) advierten que “En zonas sísmicas, existen estructuras altamente vulnerables en las que no se puede prever el daño que podrían sufrir ante un determinado grado de intensidad sísmica, debido a que fueron construidas sin seguir normativas de diseño sísmico o utilizando normas ya obsoletas”. Además, el diseño y la configuración de una edificación están influenciados por su forma, tipo, disposición, resistencia, geometría, y otros aspectos que definen los diferentes sistemas estructurales, integrándose en un enfoque global. Por lo tanto, los estudios de daño frente a funcionalidad en contextos urbanos deben considerar tantos aspectos estructurales como operativos y urbanísticos, para ofrecer información útil en la prevención de desastres y en la planificación de la gestión de riesgos, lo que resulta esencial para determinar el grado de resiliencia sísmica de un sistema estructural o conjunto de estructuras. En este sentido, estos estudios son un punto de partida crucial para tomar decisiones relacionadas con la rehabilitación o demolición de edificaciones, reflejando un grado de resiliencia basado en la vulnerabilidad derivada de su desempeño estructural. Rossetto & Elnashai (2003) sostienen que una estructura resiliente incluye un diseño sostenible, definido como un sistema con un rendimiento sísmico adecuado. Por lo tanto, un sistema estructural expuesto a un evento sísmico requiere una cuantificación y caracterización precisas de su impacto, lo que incluye daños físicos directos en los sistemas estructurales, la pérdida de vidas humanas y los efectos en el entorno. Además, una variable común que permite la integración es la cuantificación de las pérdidas económicas directas e indirectas, evaluadas desde la perspectiva de la gestión de

riesgos como la Pérdida Máxima Probable (PML) y la Pérdida Anual Esperada (PAE). Aroquipa (2022, 2024); Yamin et al. (2017) indican que “Las pérdidas económicas directas se refieren a los recursos económicos necesarios para reparar o reconstruir el daño físico causado en elementos y componentes estructurales y no estructurales”; mientras que las pérdidas económicas indirectas, o secundarias, están relacionadas con la interrupción del funcionamiento de la estructura y el impacto económico de la operatividad parcial o total después del sismo.

Mediante la evaluación de los daños, el tipo de evento, el daño acumulado, los costos de reparación y el análisis de vulnerabilidad, se establece la resiliencia de un sistema estructural o su capacidad de recuperación. Para definir la resiliencia, se propone una metodología que describa de manera rigurosa las pérdidas asociadas a los elementos estructurales en función de la intensidad sísmica. Según Aroquipa (2022, 2024); Yamin et al. (2017), "para garantizar un control preciso de las variables pertinentes, es esencial seleccionar un conjunto de señales sísmicas que representen las características sismológicas y geotécnicas del sitio en estudio," así como realizar un análisis de la respuesta dinámica del sistema estructural mediante un análisis dinámico incremental (IDA) o un análisis dinámico no lineal, ya sea detallado o simplificado. Este enfoque establece un modelo matemático de componentes que identifica la susceptibilidad a daños en función de la fragilidad, lo que permite cuantificar los costos y tiempos de reparación del sistema estructural y, en consecuencia, definir la función de vulnerabilidad. La metodología se desarrollará con base en la selección de edificaciones autoconstruidas de 2 a 6 niveles, integrando tanto las pérdidas económicas como las incertidumbres asociadas a cada una de las variables. Además, se propone evaluar factores prácticos como las diferencias en la ubicación geográfica, economías de escala, particularidades del mercado, costos mínimos de intervención o el costo total de reemplazo. También se deberán considerar los costos asociados a la interrupción de operaciones durante

el tiempo necesario para reparar los daños y afectaciones. Al procesar estas variables en un modelo matemático, se determinan la Pérdida Máxima Probable (PML) y la Pérdida Anual Esperada (PAE), lo que permite evaluar el grado de resiliencia del sistema estructural (Aroquipa, 2024).

## **1.2. Descripción del problema**

La descripción del problema se centra en la resiliencia de las viviendas autoconstruidas en Lima frente a sismos, considerando la metodología propuesta en el planteamiento. En Lima, la autoconstrucción surge como una respuesta común a la escasez de viviendas accesibles y la limitación de recursos económicos, generando asentamientos informales con serias preocupaciones sobre la seguridad estructural y la resistencia sísmica. Estas edificaciones se construyen a menudo sin seguir los códigos de construcción actuales, utilizando materiales de calidad inferior y sin supervisión técnica profesional, lo que resulta en estructuras altamente vulnerables ante daños sísmicos. Aunque las mejoras en el diseño estructural se enfocan principalmente en nuevas construcciones, el volumen de estructuras existentes es significativo, lo que resalta la necesidad de mejorar la resiliencia de estas edificaciones mediante procesos de refuerzo adaptados a cada sistema estructural. La metodología propuesta abarca la selección de edificaciones autoconstruidas representativas, la identificación de señales sísmicas pertinentes, el análisis de la respuesta dinámica, el desarrollo de modelos matemáticos de componentes y la cuantificación de costos y tiempos de reparación, lo cual establece la base para evaluar la vulnerabilidad y resiliencia de estas estructuras. La resiliencia sísmica se define como la capacidad de mantener su funcionalidad del sistema estructural durante un período definido después de un sismo, y su determinación implica la integración de aspectos estructurales, operativos, urbanísticos y sociales, así como la cuantificación de pérdidas económicas directas e indirectas. Por lo tanto, la aplicación de estudios de resiliencia sísmica

en contextos urbanos como Lima es esencial para aplicar la rehabilitación de los sistemas estructurales para mejorar la capacidad de las comunidades para enfrentar los desastres naturales.

Por otro lado, para determinar la resiliencia de un sistema estructural autoconstruido frente a sismos, es esencial evaluar su nivel de daño y su capacidad de funcionamiento. Esto implica definir el alcance del estudio, considerando factores como los daños potenciales, la amenaza sísmica y la información disponible sobre estructuras y eventos pasados. Una vez establecidos estos factores, se puede evaluar la vulnerabilidad del sistema ante acciones sísmicas y su capacidad de desempeño, lo que permite determinar su índice de resiliencia.

La resiliencia sísmica se basa en las curvas de vulnerabilidad, que se derivan de las curvas de fragilidad y se utilizan para determinar la función de pérdida y daño, y el factor de resiliencia sísmica. Estos índices son herramientas útiles para la gestión del riesgo sísmico, proporcionando una precisión aceptable en la evaluación de la resiliencia de edificios críticos. Consecuentemente, distinguir entre la confiabilidad y la resiliencia de un sistema estructural es crucial. La confiabilidad se evalúa de manera probabilística y se centra en los modos de falla, mientras que la resiliencia incorpora el historial de desempeño después de eventos significativos, reflejando los efectos en la comunidad afectada. La resiliencia también debe considerar la incertidumbre y la sensibilidad a las fuentes de incertidumbre, manteniendo separadas la incertidumbre epistémica y la aleatoria. Esto requiere preguntas de investigación específicas para lograr estos objetivos.

### **1.3. Formulación del problema**

#### ***1.3.1. Problema General.***

- ✓ ¿Cuál es el grado de resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas frente a sismos de moderada a alta intensidad?

#### ***1.3.2. Problemas Específicos***

- ✓ ¿Cuál es la propensión de las viviendas autoconstruidas a sufrir daños durante un sismo, considerando sus atributos de diseño físico y estructural?
- ✓ ¿Cuál es el impacto de la autoconstrucción en la seguridad estructural y la resistencia sísmica de las edificaciones?
- ✓ ¿Cuál sería una metodología efectiva y rigurosa para determinar el grado de resiliencia de las viviendas autoconstruidas frente a eventos sísmicos?
- ✓ ¿Cómo determinar el índice de resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas, considerando aspectos estructurales y operativos?

### **1.4. Antecedentes**

Los antecedentes de la investigación sirven como una guía objetiva, basada en las recomendaciones derivadas de estudios previos, lo que también resulta útil para el análisis y la discusión de los resultados. Se presentan de manera concisa los planteamientos, análisis y hallazgos de investigaciones anteriores con el propósito de fortalecer y enriquecer la discusión.

#### ***1.4.1. Internacionales***

Tarque & Pancca-Calsin (2022) realizaron un trabajo de investigación titulado “Building constructions characteristics and mechanical properties of confined masonry walls in San Miguel (Puno-Perú)” donde especifica que:

“La autoconstrucción y autogestión de viviendas es una práctica común en varias ciudades del Perú, incluyendo diversas zonas del distrito de San Miguel (Puno). Esto se debe a la falta de recursos económicos para contratar a profesionales que diseñen y construyan las viviendas. Como resultado, muchos residentes construyen sin orientación técnica y emplean materiales que no cumplen con los estándares de calidad. Las edificaciones en la zona, por lo tanto, presentan diversas patologías constructivas que evidencian su alta vulnerabilidad sísmica, indicando un incumplimiento de los lineamientos del Código de Diseño de Albañilería Peruano NTE 070. Para evaluar esta vulnerabilidad sísmica en las viviendas de San Miguel, como primer paso se decidió realizar un relevamiento de las patologías y tipologías constructivas. Luego, se procedió a caracterizar y evaluar las propiedades físico-mecánicas de los muros de mampostería, construyendo y ensayando 24 pilotes y 24 muros pequeños, cuyos materiales fueron obtenidos del casco urbano de la zona estudiada. Los resultados de las pruebas experimentales revelaron que los valores de compresión axial y cortante diagonal de los prismas son inferiores a los mínimos especificados por el Código de Construcción del Perú, lo que incrementa la vulnerabilidad sísmica de estas construcciones. Por lo tanto, muchas de las viviendas en el distrito podrían sufrir daños graves e incluso colapsar en caso de un evento sísmico.”

Según Leal (2017) en su estudio de 2017, "Evaluación de vulnerabilidad de viviendas afectadas por hundimientos en función de los tipos de materiales empleados en el pueblo de Jocotepec, Jalisco", Leal se propuso diagnosticar los riesgos de colapso de las edificaciones en Jocotepec que están afectadas por fallas geológicas:

“Este riesgo se asocia principalmente con los materiales de construcción utilizados y la relación de estos con las vulnerabilidades estructurales. Para lograr esto, se adoptó una metodología mixta, que combinaba enfoques cualitativos y cuantitativos. La

investigación comenzó con la recolección de datos mediante la observación de las grietas en las estructuras, a las cuales se les asignaron valores para categorizar el daño observado. Además, se utilizaron métodos de campo para evaluar las vulnerabilidades estructurales asociadas a las subsidencias y desarrollar un mapa de hundimiento para el área estudiada. Los resultados mostraron que muchas de las construcciones presentan altas vulnerabilidades, las cuales pueden atribuirse a las características típicas de las viviendas del pueblo, construidas con mampostería no confinada y mal reforzada, y sin cumplir con normativas sísmicas o reglamentos de construcción adecuados. Finalmente, se recomienda llevar a cabo reparaciones específicas en las estructuras dañadas o proceder con reconstrucciones que mejoren la resiliencia de las edificaciones.”

Yamin et al. (2017) presentaron en su artículo investigación denominada “Evaluación probabilística de vulnerabilidad sísmica de edificios en términos de pérdidas económicas”, donde describe que:

“El análisis de probabilística del riesgo desde la evaluación sísmico estima las mermas económicas en construcciones mediante funciones de distribución de probabilidad (PDF) para eventos estocásticos que simulan el peligro sísmico en áreas específicas. Este enfoque riguroso utiliza funciones de vulnerabilidad adaptadas a diferentes tipologías de edificación, proporcionando una metodología consistente para calcular las pérdidas económicas. Las pérdidas se modelan mediante funciones de distribución beta para cada nivel de intensidad sísmica, representando las pérdidas esperadas y su variabilidad, ofreciendo un contraste a las metodologías que dependen más de juicios subjetivos.”

Tiziana-Rossetto & Elnashai (2005) presentaron un estudio sobre un procedimiento analítico para derivar curvas de vulnerabilidad basadas en desplazamientos, en el que proponen lo siguiente:

“Este enfoque introduce un método para desarrollar curvas de vulnerabilidad analíticas fundamentadas en desplazamientos para estructuras de concreto armado, buscando un equilibrio entre la confiabilidad y la eficiencia computacional. Se utiliza un análisis de empuje adaptativo dentro de un espectro de capacidad para evaluar el comportamiento de las estructuras ante diferentes intensidades sísmicas, tomando en cuenta las incertidumbres asociadas a los parámetros de los materiales y el movimiento del suelo. Además, se implementa una nueva escala de daños para concreto armado, calibrada mediante ensayos experimentales, que permite medir el daño estructural. Los resultados obtenidos facilitan la construcción de curvas de vulnerabilidad, aplicadas específicamente a pórticos de concreto armado con insuficiente resistencia sísmica.”

Hosseinzadeh & Galal (2020) en su investigación titulado "Evaluación de la resiliencia sísmica en sistemas de edificios con muros de corte de mampostería reforzada mediante elementos de contorno de mampostería," describen en detalle el desarrollo de un análisis de resiliencia aplicado a un componente estructural.

“El concepto de resiliencia sísmica evalúa la capacidad de las estructuras para resistir y recuperarse de sismos. Se utilizó el software OpenSees para modelar numéricamente un edificio RMSW de diez pisos, mejorando su desempeño sísmico mediante la incorporación de MBE confinados. Se realizaron análisis dinámicos incrementales con múltiples registros de movimiento del suelo para desarrollar curvas de fragilidad y evaluar el inicio del colapso. Los resultados indicaron que la adición de MBE confinados a los muros de corte mejora significativamente la resistencia sísmica del edificio, destacando el efecto positivo de los MBE en la respuesta sísmica del sistema.”

Rezaei Ranjbar & Naderpour (2020) en su artículo titulado "Evaluación probabilística de la resiliencia sísmica de edificios vitales típicos en términos de curvas de vulnerabilidad", explican lo siguiente:

“La evaluación de la resiliencia sísmica se considera una práctica crucial. En este contexto, la resiliencia representa la capacidad de una estructura, como un edificio, puente o red vital, para mantener su nivel de eficiencia o funcionalidad dentro de una comunidad durante un periodo específico, determinado ya sea por la comunidad o por expertos en la materia. En este estudio, se seleccionó un hospital típico como ejemplo de una estructura vital. Para realizar el análisis dinámico incremental, se eligieron 22 registros basados en su proximidad a la falla. Posteriormente, se utilizó un método basado en coeficientes para generar las curvas de fragilidad, a partir de las cuales se derivaron directamente las curvas de vulnerabilidad. Estas curvas son esenciales para calcular la función de pérdida y el índice de resiliencia sísmica. Los resultados indican que las curvas de vulnerabilidad son herramientas precisas y eficaces para evaluar la resiliencia sísmica de estructuras vitales.”

Joyner & Sasani (2020) en su artículo científico titulado "Desempeño de edificios para la resiliencia ante sismos," plantean lo siguiente:

“La construcción de edificios con un desempeño sísmico adecuado es fundamental para asegurar la resiliencia frente a terremotos. Además de cumplir con los estándares de seguridad establecidos en los códigos de construcción, es esencial evaluar tanto la pérdida de funcionalidad como los costos de reparación. El daño estructural y no estructural causado por un sismo es un indicador clave para medir el desempeño de un edificio. Un enfoque de evaluación basado en riesgos permite cuantificar cómo los cambios en la rigidez, resistencia y capacidad de deformación afectan el daño, y sugiere mejoras en los códigos de construcción. Para estimar los costos de reparación y la

pérdida de funcionalidad a lo largo de la vida útil de un edificio, se utilizan estadísticas de demanda, modelos de capacidad y evaluaciones de riesgo sísmico. El análisis de diversas variables de diseño revela su influencia en el desempeño sísmico y contribuye a mejorar la resiliencia”.

Dumova Jovanoska (2000) en su investigación titulado "Curvas de fragilidad para estructuras de concreto armado en la región de Skopje (Macedonia)," propone un enfoque para establecer la relación entre la intensidad sísmica y los daños a través de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño:

“El método presentado analiza la vulnerabilidad de las estructuras de concreto armado utilizando dos conjuntos de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño. El primer conjunto se aplica a estructuras de hasta 10 pisos, con un marco de seis pisos como referencia, mientras que el segundo se dirige a estructuras de más de 10 pisos, utilizando una muestra de 16 pisos. Estas estructuras fueron diseñadas según el código de construcción de Macedonia, considerando la amenaza sísmica local. Dado el limitado número de registros sísmicos reales disponibles en Skopje, se generaron 240 historias sísmicas sintéticas. La respuesta de las estructuras fue evaluada mediante análisis dinámico no lineal, identificando cinco estados de daño. Se calcularon índices de daño global para cada estado, y a partir de estas simulaciones, se establecieron los conjuntos de curvas de fragilidad y las matrices de probabilidad de daño”.

#### ***1.4.2. Nacionales***

Se llevaron a cabo investigaciones a nivel local como parte de tesis de pregrado y posgrado en diversas regiones del país. Estos estudios muestran que la autoconstrucción es un problema generalizado en el Perú que necesita ser abordado. Los resultados de cada investigación tienden a ser similares debido al enfoque planteado.

Ramírez & Viera (2018) en su estudio titulado "Vulnerabilidad sísmica de las viviendas autoconstruidas de albañilería confinada en la ciudad de Recuay-Ancash-2017", se propuso evaluar la vulnerabilidad sísmica de las viviendas analizadas.

“Para ello, se empleó una metodología sencilla desarrollada por Mosqueira y Tarque (2005). Se evaluaron 28 viviendas en Recuay, seleccionadas de tres barrios: Abajo, Centro y Arriba, con la colaboración del personal de INDECI y de la oficina de Infraestructura de la Municipalidad de Recuay. Los resultados revelaron que el 71% de los muros de las viviendas eran adecuados, el 21% presentaban densidades de muros aceptables, y solo el 8% mostraban densidades de muros inadecuadas. En cuanto a la calidad de construcción y los materiales utilizados, se clasificó al 32% de las viviendas como de mala calidad, al 68% como de calidad regular, y ninguna alcanzó la categoría de buena calidad. Respecto a la estabilidad, el 4% de los muros fueron considerados totalmente estables, el 64% parcialmente estables, el 18% totalmente inestables, y el 14% de las viviendas no contaban con tabiques o parapetos. Finalmente, se concluyó que el 36% de las viviendas presentan alta vulnerabilidad sísmica, otro 36% tienen una vulnerabilidad media, y el 28% tienen baja vulnerabilidad.”

Flores (2015) en su tesis de 2015 titulada "Vulnerabilidad, peligro y riesgo sísmico en viviendas autoconstruidas del distrito de Samegua, región Moquegua," Flores Ortega se centró en analizar las vulnerabilidades, peligros y riesgos sísmicos que afectan a las viviendas autoconstruidas en Samegua, utilizando encuestas y reportes de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

“Empleó una metodología sencilla para evaluar los riesgos sísmicos de estas viviendas, analizando 25 edificaciones en Samegua, Moquegua. Los resultados mostraron que el 56% de las viviendas presentan una alta vulnerabilidad sísmica, mientras que el 44% tiene una vulnerabilidad media, principalmente debido a la densidad de los muros y la

calidad del trabajo del constructor. En cuanto a los peligros sísmicos, todos se clasificaron como de nivel medio, influenciados por el tipo de suelo y la sismicidad de la región. Respecto a los riesgos sísmicos, el 56% fueron catalogados como altos y el 44% como medios, reflejando la interacción entre vulnerabilidades y peligros sísmicos. Flores Ortega concluye que los principales problemas se originan en configuraciones estructurales inadecuadas, el uso de materiales de baja calidad, prácticas de construcción deficientes y la sismicidad de la zona. Subraya la necesidad de implementar normativas de construcción adecuadas, ofrecer capacitaciones y mitigar los factores de riesgo.”.

Silva (2017) realizó un estudio titulado "Riesgo sísmico de las viviendas de albañilería confinada de la urbanización Las Almendras de la ciudad de Jaén," cuyo objetivo principal fue determinar el nivel de riesgo sísmico de las viviendas de albañilería confinada en esa urbanización. Para ello, empleó una metodología previamente utilizada en la costa peruana por los ingenieros Mosqueira y Tarque en 2005.

El estudio evaluó las características técnicas, errores arquitectónicos, procesos constructivos y de diseño de 50 edificaciones, recopilando datos mediante fichas de encuestas que incluían información sobre cada vivienda, problemas de ubicación, estructura, materiales deficientes y otros factores que degradan la construcción. Los resultados revelaron que el 44% de las viviendas tenía una densidad de muros adecuada, mientras que un sorprendente 56% presentaba una densidad inadecuada, sin registrarse densidades aceptables. En cuanto a la calidad de la construcción, se encontró que el 54% de los constructores utilizaron materiales de baja calidad, el 34% de calidad regular, y solo el 12% empleó materiales de buena calidad. En términos de estabilidad estructural, el 16% de las viviendas mostró estabilidad en todos sus muros, el 72% en algunos muros, y el 12% presentó inestabilidad total en los muros. Finalmente, el

estudio concluyó que el 56% de las viviendas evaluadas presentaban alta vulnerabilidad sísmica, el 20% vulnerabilidad media, y el 24% baja vulnerabilidad, resultando en que el 56% de las viviendas enfrentaba un alto riesgo sísmico.

Becerra (2015) presentó su tesis titulada "Riesgo sísmico de las edificaciones en la urbanización Horacio Zevallos de Cajamarca - 2015," la cual se enfocó en determinar los niveles de riesgo sísmico de las edificaciones en dicha urbanización.

El estudio se llevó a cabo mediante una metodología que combinaba investigación de campo y teórica, seleccionando edificaciones específicas para encuestarlas como muestra. En la parte teórica, se realizó un análisis detallado de cada encuesta y reporte con el fin de evaluar los riesgos sísmicos asociados a las edificaciones. Los resultados revelaron que las unidades de albañilería artesanal utilizadas en las viviendas mostraban baja resistencia, alta variabilidad dimensional y una significativa absorción de agua, lo que se atribuyó a la falta de uniformidad en el proceso de cocción. El estudio concluyó que las viviendas examinadas presentaban deficiencias estructurales que podrían tener graves consecuencias durante un sismo, incluyendo altos riesgos de pérdidas materiales y de vidas humanas. Además, se observó que los materiales empleados en la construcción de las viviendas variaban en calidad, desde regulares hasta deficientes, sin evidencia de la aplicación de controles de calidad efectivos.

Según Huashua & Sánchez (2017) llevaron a cabo un estudio titulado "Análisis de la vulnerabilidad sísmica de las viviendas autoconstruidas de la Urbanización Bella Vista de la ciudad de Abancay – Apurímac". El principal objetivo de la investigación fue determinar las vulnerabilidades sísmicas de las viviendas autoconstruidas en dicha urbanización.

Utilizando un método cualitativo que incluyó índices de vulnerabilidad, se realizaron inspecciones visuales detalladas y encuestas en cada vivienda del área estudiada,

configurando así un estudio descriptivo. Los resultados revelaron que el 2% de las viviendas en la Urbanización Bella Vista tienen vulnerabilidades bajas, con edificaciones que podrían sufrir daños moderados o leves, pero conservando la mayor parte de su resistencia estructural. El 46% de las viviendas presentan vulnerabilidades de grado medio, donde, aunque no se espera que las estructuras colapsen ante un daño relevante, es necesario realizar rehabilitaciones para evitar riesgos mayores. El 52% de las viviendas exhiben una alta vulnerabilidad, con edificaciones que tienen altas probabilidades de fallo total o presentan diversos daños estructurales que requieren reparaciones significativas o incluso la demolición. El estudio concluyó que en las viviendas autoconstruidas de albañilería de la urbanización se observó una técnica constructiva deficiente que conduce a un mal comportamiento ante sismos, debido a que no se respetan los procesos constructivos adecuados para la albañilería confinada.

Taboada et al. (2018) en su artículo titulado "Análisis y diseño de un hospital aislado sísmicamente empleando métodos de resiliencia sísmica", presentaron un estudio con el objetivo de prevenir daños y pérdidas de vidas humanas basándose en el desempeño estructural.

La Norma Peruana de Diseño Sismorresistente (E-030) permite que las estructuras sufran daños para evitar la pérdida de vidas humanas, pero no establece parámetros para evaluar el desempeño post-sísmico. En este estudio, se diseñó un hospital utilizando metodologías que consideran estados de daño y niveles de resiliencia. Se analizaron parámetros como aceleraciones, derivas y estados de daño, además de la capacidad de recuperación según la clasificación RED<sub>i</sub>. Los resultados indicaron que el hospital alcanzó la clasificación platino, con un tiempo de recuperación de 76 horas y un costo de reparaciones equivalente al 0.9% del costo inicial, lo que sugiere daños mínimos en elementos estructurales y no estructurales.

## **1.5. Justificación de la investigación**

### ***1.5.1. Justificación Teórica.***

La autoconstrucción de viviendas es común en áreas urbanas con escasez de viviendas accesibles y recursos limitados, como en Lima, Perú, donde ha dado lugar a asentamientos informales. Estas edificaciones carecen de supervisión técnica y son vulnerables a desastres naturales, especialmente sismos. Los sismos representan un gran riesgo en Lima y otras regiones sísmicamente activas, aumentando la probabilidad de daños graves en viviendas autoconstruidas, lo que puede resultar en pérdida de vidas humanas y materiales. Investigar la resiliencia sísmica de estas edificaciones es crucial para comprender su capacidad de resistir y recuperarse de sismos de moderada a alta intensidad.

Un enfoque de evaluación del desempeño basado en la resiliencia sísmica permite cuantificar el impacto de posibles cambios en la rigidez, resistencia y capacidad de deformación de las estructuras, facilitando así mejoras en su rendimiento. Para ello, se utilizan estadísticas de demanda y modelos de riesgo sísmico con el fin de evaluar los costos de reparación y la pérdida de funcionalidad a lo largo de la vida útil de cada edificio. Este análisis permitirá demostrar cómo influyen estas variables en el desempeño sísmico y contribuirá a mejorar la resiliencia del sistema estructural. Además, el estudio ampliará el conocimiento teórico y desarrollará un procedimiento simplificado para determinar la resiliencia sísmica de estas edificaciones. Los resultados obtenidos se compararán con estudios previos para fortalecer la nueva teoría, asegurando una comprensión integral de la resiliencia y proporcionando información crucial para mejorar la seguridad ante futuros sismos.

### ***1.5.2. Justificación Metodológica***

Actualmente, la resiliencia sísmica está siendo desarrollada con mayor énfasis por numerosos investigadores a nivel mundial, y los resultados de estas investigaciones se utilizan

como herramientas para la gestión del riesgo. En la presente investigación, se abordará este tema de la siguiente manera: primero, se realizará un análisis de riesgo sísmico para la zona de estudio, que incluirá el análisis del peligro sísmico, la evaluación de los niveles de intensidad sísmica, el análisis de respuesta sísmica incremental (IDA), la creación de curvas de probabilidad de daño estructural (PDS), la estimación de funciones de fragilidad y vulnerabilidad, y la evaluación de índices de resiliencia.

Finalmente, la identificación de la vulnerabilidad y los índices de resiliencia se priorizará en comparación con otros estudios. Siguiendo la metodología establecida, que incluye un análisis simplificado, se obtendrá el resultado final de la resiliencia del sistema estructural evaluado. Este análisis se expresará en términos de pérdidas, como el nivel máximo de pérdida (PML) y el nivel probable de pérdida esperada (PAE). Por ejemplo, tras un evento sísmico, y dependiendo de su magnitud, se podrá estimar la pérdida en términos de costos y el tiempo necesario para restaurar la funcionalidad del sistema estructural afectado. Este enfoque integral permitirá una comprensión detallada de la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas en Lima y proporcionará información valiosa para mejorar su seguridad y capacidad para resistir futuros eventos sísmicos.

### ***1.5.3. Justificación Práctica.***

La investigación sobre la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas en Lima tiene importantes implicaciones prácticas. En primer lugar, proporcionará información crucial para mejorar la seguridad y la capacidad de resistencia de estas edificaciones frente a futuros eventos sísmicos. Al comprender mejor cómo afectan los sismos a estas estructuras y qué factores influyen en su resiliencia, se podrán desarrollar recomendaciones específicas para su diseño, construcción y reforzamiento.

Además, esta investigación permitirá evaluar de manera más precisa los riesgos asociados a las viviendas autoconstruidas en áreas sísmicas, lo que puede ser fundamental para la planificación urbana y la toma de decisiones en materia de políticas públicas. Al identificar las vulnerabilidades específicas de estas edificaciones, se podrán implementar medidas preventivas y de mitigación que reduzcan su exposición al riesgo sísmico y, en última instancia, salvaguarden la vida y la propiedad de los habitantes. Otra implicación práctica importante es la posibilidad de desarrollar herramientas y metodologías de evaluación de la resiliencia sísmica que sean accesibles y aplicables en contextos reales. Esto incluye la creación de procedimientos simplificados y técnicas de análisis que puedan ser utilizadas por profesionales de la construcción, autoridades locales y comunidades afectadas para evaluar el estado de sus viviendas y tomar medidas adecuadas para mejorar su resiliencia. Finalmente, la investigación sobre la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas en Lima no solo contribuirá al conocimiento teórico en este campo, sino que también tendrá un impacto directo y tangible en la seguridad y el bienestar de las personas que viven en estas comunidades vulnerables. Su aplicación práctica ayudará a reducir los riesgos sísmicos, fortalecer la infraestructura urbana y promover el desarrollo sostenible en la región.

#### ***1.5.4. Justificación Social.***

La investigación sobre la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas en Lima tiene una importante justificación social. En primer lugar, estas viviendas son habitadas por una parte significativa de la población, especialmente aquellos con recursos económicos limitados que no tienen acceso a viviendas formales. Por lo tanto, mejorar la seguridad y la capacidad de resistencia de estas estructuras es fundamental para proteger la vida y el bienestar de un gran número de personas. Además, estas comunidades autoconstruidas suelen estar ubicadas en áreas urbanas marginadas y vulnerables, donde los servicios básicos y la infraestructura son deficientes. Al fortalecer la resiliencia sísmica de las viviendas en estas

áreas, se puede contribuir a reducir las desigualdades sociales y promover un desarrollo más equitativo y sostenible. Otro aspecto importante es el impacto económico y social de los desastres naturales en estas comunidades. Los sismos pueden causar daños significativos a las viviendas, lo que conduce a la pérdida de hogares, la interrupción de la vida cotidiana y la generación de costos económicos elevados para la reconstrucción. Al mejorar la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas, se pueden mitigar estos impactos negativos y contribuir a la recuperación más rápida y efectiva de las comunidades afectadas por desastres.

Además, la investigación en este ámbito puede incentivar la participación comunitaria y aumentar la capacidad de las personas para enfrentar riesgos naturales. Al incluir a los residentes en el proceso de evaluación y mejora de la resiliencia sísmica de sus viviendas, se logra empoderarlos y se fortalecen los vínculos sociales dentro de la comunidad. Por lo tanto, el estudio de la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas en Lima tiene una justificación social evidente, ya que contribuye a proteger la vida y el bienestar de las personas, disminuir las desigualdades sociales, mitigar los impactos económicos de los desastres naturales y reforzar la capacidad de las comunidades para enfrentar los riesgos sísmicos.

#### ***1.5.5. Importancia de la Investigación***

La investigación sobre la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas adquiere una importancia crucial debido a su enfoque en el modelamiento matemático y la obtención de datos concretos sobre la capacidad de estas estructuras para resistir eventos sísmicos. Este enfoque proporciona una base sólida para el desarrollo de políticas y estrategias efectivas para mejorar la seguridad y la calidad de vida de los residentes en áreas vulnerables. El modelamiento matemático permite analizar de manera precisa y detallada el comportamiento estructural de las viviendas autoconstruidas ante diferentes niveles de intensidad sísmica. Al obtener datos cuantitativos sobre la resiliencia sísmica de estas estructuras, se pueden identificar áreas de mejora y diseñar intervenciones específicas para fortalecer su resistencia a

los sismos. Además, la investigación en este campo tiene el potencial de generar conocimiento científico y técnico que pueda ser aplicado en otras regiones sísmicamente activas del mundo. Los modelos y metodologías desarrollados pueden ser adaptados y utilizados por investigadores y profesionales en áreas con características similares, lo que contribuiría a la reducción de riesgos y la protección de comunidades vulnerables en todo el mundo.

En un contexto más amplio, esta investigación puede tener un impacto significativo en la reducción de pérdidas humanas y materiales durante desastres naturales. Al mejorar la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas, se puede minimizar el riesgo de lesiones y muertes entre la población, así como también reducir los costos asociados a la reconstrucción y reparación de infraestructuras dañadas. En resumen, la investigación orientada al modelamiento matemático y la obtención de la resiliencia sísmica para viviendas autoconstruidas es fundamental para el desarrollo de estrategias efectivas de mitigación de riesgos, la generación de conocimiento aplicable a nivel global y la protección de vidas y bienes durante desastres naturales.

#### **1.5.6. Fundamento**

El fundamento de esta investigación se apoya en los trabajos de Aroquipa (2022, 2024); Yamin, (2015) sobre riesgo sísmico en edificaciones, que establece las bases teóricas esenciales para la evaluación del riesgo. Se integran elementos de propuestas anteriores, como FEMA p-58; FEMA (2012); Krawinkler (2002); Miranda (2001), enfocándose en el cálculo de pérdidas y su incertidumbre a través de la evaluación de variables como intensidad sísmica, demanda sísmica en componentes expuestos, estados de daño y costos de reparación. La investigación considera la variabilidad de la amenaza mediante familias de acelerogramas representativas de posibles eventos sísmicos y la incertidumbre asociada. El parámetro  $Sa(T_i)$ , se selecciona como control de pérdidas debido a su adecuación para representar la variación de intensidades

sísmicas y considerar los efectos de amplificación del subsuelo. Se descarta el uso de la aceleración máxima del terreno (PGA) debido a su insensibilidad a dichos efectos.

La resiliencia sísmica se convierte en un instrumento vital en la gestión del riesgo, requiriendo la cooperación de capacidades y recursos a diferentes niveles y vinculándose al desarrollo sostenible. Su aplicación implica decisiones administrativas y operativas para reducir el impacto de amenazas naturales y desastres. La construcción inadecuada de infraestructura, la degradación ambiental, la sobreexplotación de recursos y el crecimiento urbano desordenado aumentan la vulnerabilidad.

## **1.6. Limitaciones de la Investigación**

### ***1.6.1. Espacial***

La investigación no está limitada espacialmente, ya que busca contribuir al avance del conocimiento tecnológico en Ingeniería Civil, específicamente en la Ingeniería Estructural y sísmica, sin restringirse a una ubicación geográfica particular.

### ***1.6.2. Temporal***

La limitación temporal de esta investigación se sitúa en la actualidad, con una perspectiva hacia el futuro. Se basa en teorías y avances actuales para fortalecer la base teórica con miras a su aplicación posterior. El desarrollo del trabajo sigue un plan de cronograma establecido para un período de seis meses, comenzando en diciembre de 2023.

## **1.7. Objetivos de la Investigación**

### ***1.7.1. Objetivo General***

- Determinar el grado de resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas frente a sismos de moderada a alta intensidad.

### ***1.7.2. Objetivos Específicos***

- Evaluar la propensión de las viviendas autoconstruidas a sufrir daños durante un sismo, considerando sus atributos de diseño físico y estructural.
- Analizar el impacto de la autoconstrucción en la seguridad estructural y la resistencia sísmica de las edificaciones.
- Desarrollar una metodología efectiva y rigurosa para determinar el grado de resiliencia de las viviendas autoconstruidas frente a eventos sísmicos.
- Establecer un índice de resiliencia sísmica para las viviendas autoconstruidas, considerando aspectos estructurales y operativos.

## **1.8. Hipótesis**

### ***1.8.1. Hipótesis Principal***

- Las viviendas autoconstruidas exhibirán un grado variable de resiliencia sísmica frente a sismos de moderada a alta intensidad.

### ***1.8.2. Hipótesis Secundarias***

- Las viviendas autoconstruidas con atributos de diseño físico y estructural más robustos serán menos propensas a sufrir daños durante un sismo.
- La autoconstrucción tendrá un impacto negativo en la seguridad estructural y la resistencia sísmica de las edificaciones.

- Una metodología efectiva y rigurosa para determinar el grado de resiliencia de las viviendas autoconstruidas frente a eventos sísmicos implicará considerar tanto aspectos estructurales como operativos.
- El índice de resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas será determinado por factores como la calidad de la construcción y las prácticas de mantenimiento.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Base teórica

La autoconstrucción es un fenómeno global, especialmente prevalente en países en desarrollo donde las estructuras se erigen sin cumplir con los estándares formales de construcción (Davis, 1978). A menudo, las familias construyen sus hogares con técnicas y materiales que varían en calidad y adecuación, lo cual puede resultar en viviendas con serias deficiencias estructurales (Turner, 1976). La autoconstrucción es común en diversas ciudades globales, reflejando la evolución cultural y la necesidad de vivienda accesible. A menudo, por falta de recursos, las construcciones se realizan sin supervisión técnica ni cumplimiento de estándares de calidad, lo que incrementa su vulnerabilidad sísmica. Un estudio en una zona determinada reveló que las propiedades físico-mecánicas de los muros de mampostería no cumplían con los mínimos del Código de Construcción del Perú, aumentando el riesgo de colapso en caso de sismo. Por tanto, es crucial evaluar y mitigar estas vulnerabilidades para prevenir daños mayores (Tarque & Pancca-Calsin, 2022).

Para Andrić & Lu (2017) “El desarrollo y la construcción de comunidades resilientes pueden mitigar significativamente los impactos negativos de los desastres y facilitar una recuperación más rápida. Este proceso requiere un entendimiento detallado del daño y la vulnerabilidad asociados con cada tipo de sistema estructural, así como del riesgo inherente a sistemas individuales y a portafolios completos. Este conocimiento es fundamental para los tomadores de decisiones, ya que les proporciona las herramientas necesarias para implementar estrategias efectivas que fortalezcan la capacidad de resistencia de las comunidades ante eventos adversos”.

#### 2.1.1. Autoconstrucción

La autoconstrucción se refiere al proceso por el cual los individuos o grupos familiares construyen sus propias viviendas con poco o ningún apoyo formal de profesionales de la construcción. Este fenómeno es prevalente en regiones donde el acceso a vivienda asequible es limitado debido a factores económicos, políticos y sociales. Las viviendas autoconstruidas son un reflejo de la autonomía local y una respuesta directa a la necesidad de albergue.

Asimismo, la autoconstrucción surge como respuesta a la creciente demanda de vivienda y la falta de recursos para acceder a soluciones formales. En este proceso, los residentes construyen de manera informal, sin supervisión técnica, utilizando materiales económicos y de variada calidad. En el contexto de la autoconstrucción, los edificios de mampostería confinada (CM) son comunes, caracterizados por muros de mampostería encerrados con elementos de hormigón armado a lo largo de sus bordes. Estos muros proporcionan rigidez lateral y transfieren cargas, siendo cruciales para la estabilidad estructural de las viviendas (Blondet et al., 2006; Flores Ortega, 2015; Yacila et al., 2019). La vulnerabilidad sísmica de viviendas construidas sin dirección técnica está influenciada por diversos factores, incluyendo la calidad de los materiales, la técnica de construcción y la planificación estructural. Estudios han demostrado que la construcción progresiva y el uso de materiales de baja calidad pueden aumentar la vulnerabilidad sísmica, especialmente cuando no hay una planificación de ingeniería adecuada para el futuro. Deficiencias en la construcción, como conexiones muro-columna deficientes, baja densidad de muros y muros no confinados, contribuyen a esta vulnerabilidad (Flores et al., 2019; Khan et al., 2021; San Bartolomé et al., 2009). La evaluación de la vulnerabilidad sísmica se basa en la comprensión de las patologías estructurales y la calidad de las construcciones. Las patologías, manifestadas como defectos sistemáticos en las edificaciones, pueden atribuirse a la mala calidad de los materiales, errores constructivos y falta de normativas y supervisión. Por lo tanto, es fundamental determinar la calidad de las construcciones CM y las propiedades de los materiales utilizados en las viviendas

autoconstruidas (Lovon et al., 2018; Parammal & D'Ayala, 2021). En contextos donde las normas constructivas son incipientes, como en el distrito de San Miguel de Puno, la inversión considerable de la población en la autoconstrucción resalta la importancia de garantizar la seguridad estructural de las viviendas ante eventos sísmicos. Este marco teórico proporciona una base para entender los desafíos y las medidas necesarias para mejorar la resiliencia de las viviendas autoconstruidas en contextos de países en vías de desarrollo.

### Figura 1

*Procesos constructivos de viviendas autoconstruidas*



Fuente: elaboración propia.

### **2.1.1.1. Características de la Autoconstrucción**

Las viviendas autoconstruidas se caracterizan por la diversidad en el uso de materiales, muchas veces reciclados o adaptados de fuentes no convencionales, y una construcción que se desarrolla en etapas, según los recursos disponibles. Estas prácticas pueden resultar en edificaciones con variabilidad significativa en términos de calidad y seguridad. El proceso convencional en la zona de estudio, costa peruana Lima, es mixta (sistema a porticado y de albañilería), sin embargo, el sistema de albañilería es el sistema predominante, y el sistema a porticado es para salvar luces según el requerimiento funcional proyectado.

#### **A. Albañilería confinada**

La técnica de albañilería confinada es ampliamente utilizada en el proceso de construcción de viviendas en áreas urbanas del Perú. Este enfoque constructivo implica la integración de muros de mampostería o albañilería, vigas, columnas y losas de concreto armado. Las columnas y vigas desempeñan un papel crucial al proporcionar flexibilidad a la estructura, lo que significa su capacidad de deformarse antes de experimentar una falla completa. En cuanto a los muros, se dividen en dos categorías: portantes, que brindan resistencia a la construcción, y no portantes, diseñados para soportar cargas perpendiculares a su superficie (Bartolomé et al., 2009). A pesar de esto, se observa que muchas construcciones informales en el país han optado por utilizar ladrillos tubulares (pandereta) para los muros portantes debido a su bajo costo, aunque estos ladrillos no son adecuados para esta función, ya que son livianos y no están diseñados para soportar cargas, lo que puede resultar en una falla frágil. En la planificación y construcción de viviendas utilizando el sistema de albañilería confinada, es esencial considerar tres factores principales para garantizar su resistencia ante sismos severos: el diseño estructural, el control de los procesos constructivos y la calidad de los materiales utilizados. La Figura 1, ilustra un ejemplo de construcción de una vivienda utilizando este método.

## **B. Aspectos Normativos y Legales**

En muchos contextos, las viviendas autoconstruidas surgen al margen de las regulaciones urbanas y los códigos de construcción en el Perú, donde normativas como E10, E20, E30, E50, E60 y E60 a menudo no son tenidas en cuenta. En este escenario, es común que la normativa de construcción sea determinada por el conocimiento empírico del maestro de obra, quien basa sus decisiones en su experiencia acumulada a lo largo de múltiples proyectos de construcción. Esta práctica plantea desafíos significativos en términos de integración urbana y seguridad estructural (Leal-Rubio, 2017; Ramírez Viera, 2018). Asimismo, la falta de adherencia a las normativas y códigos de construcción puede exponer a las viviendas autoconstruidas a riesgos estructurales y de seguridad, ya que las prácticas informales pueden no seguir los estándares adecuados de resistencia y estabilidad. Esta situación subraya la necesidad de abordar los vacíos normativos y promover la adopción de estándares de construcción apropiados para garantizar la seguridad de las estructuras y de quienes las habitan (Parammal & D'Ayala, 2021). Sin embargo, es importante reconocer que la flexibilización de las normativas y la implementación de programas de regularización y titulación pueden desempeñar un papel clave en la integración de estas construcciones autoconstruidas en el tejido urbano formal. Estos programas pueden proporcionar un marco legal para regularizar la tenencia de la tierra y mejorar las condiciones de vivienda de los residentes, al tiempo que garantizan que las construcciones cumplan con ciertos estándares mínimos de seguridad y calidad. Al fomentar la regularización y titulación de las viviendas autoconstruidas, se pueden abordar de manera integral los desafíos relacionados con la informalidad en la construcción y promover una mayor cohesión urbana. Además, la implementación de mecanismos de apoyo técnico y financiero puede ayudar a los propietarios de viviendas autoconstruidas a mejorar gradualmente sus estructuras y acceder a recursos para realizar mejoras que aumenten su resiliencia ante eventos naturales y su calidad de vida en general.

### C. Vulnerabilidad y Resiliencia Sísmica

La vulnerabilidad sísmica de las viviendas autoconstruidas es una preocupación mayor, especialmente en regiones propensas a terremotos. La falta de diseño estructural y la calidad variable de los materiales pueden aumentar el riesgo de colapso durante eventos sísmicos. Investigaciones en este campo buscan desarrollar métodos accesibles para reforzar la resiliencia sísmica de estas estructuras sin comprometer su viabilidad económica.

**Tabla 1**

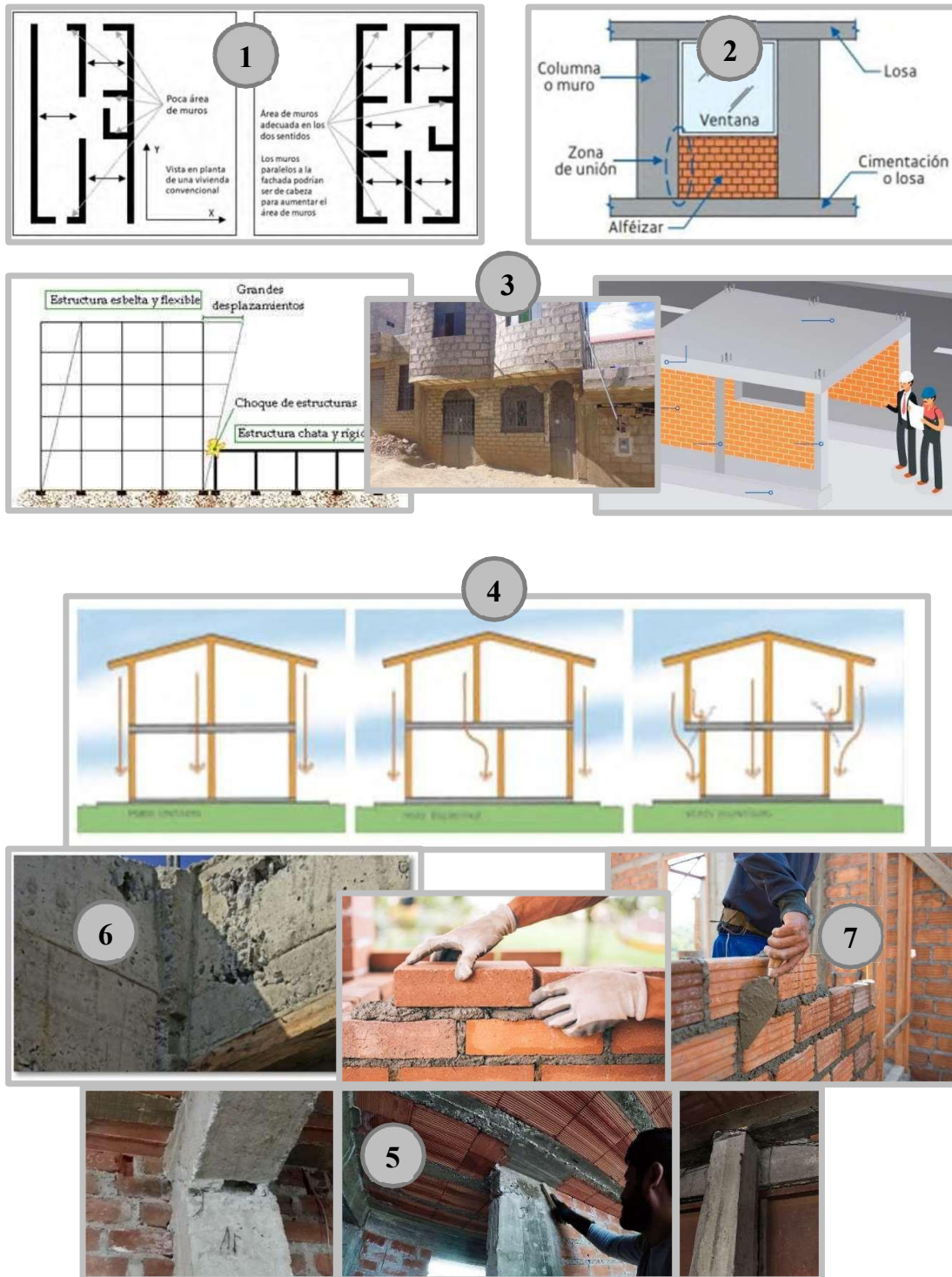
*Características más relevantes de la vulnerabilidad de la autoconstrucción*

N <sup>a</sup>	Característica	Descripción
1	Densidad de muros estructurales	Presencia adecuada de muros estructurales bien confinados en cada dirección principal para garantizar la resistencia sísmica de la edificación.
2	Ausencia de juntas de aislamiento sísmico	Falta de juntas de aislamiento sísmico, lo que puede resultar en la formación de grietas en los vanos de las ventanas y otros elementos estructurales.
3	Falta de juntas sísmicas entre edificaciones contiguas	Ausencia de juntas sísmicas entre dos edificaciones contiguas, lo que puede provocar el choque de las estructuras durante un sismo, generando grietas y fracturas en los elementos estructurales.
4	Continuidad en los muros verticales	Falta de continuidad en los muros verticales, lo que puede ocasionar una transmisión inadecuada de esfuerzos entre los muros superiores e inferiores, generando un efecto de torsión en la estructura.
5	Separación entre columnas confinantes	Separación considerable entre columnas confinantes, lo que puede comprometer el confinamiento del muro y afectar su capacidad de soportar cargas sísmicas.
6	Formación de cangrejeras	Presencia de espacios vacíos en el concreto, conocidos como cangrejeras, que pueden debilitar la resistencia de los elementos estructurales. Su formación puede ser causada por diversos factores, como un deficiente proceso de colocado y vibrado de concreto.
7	Espesor excesivo de juntas horizontales y verticales	Incumplimiento de la normativa respecto al espesor máximo de juntas horizontales y verticales, lo que puede debilitar la resistencia de los muros portantes. La normativa establece límites para garantizar la integridad estructural de los muros.

Fuente: elaboración propia.

**Figura 2**

*Deficiencias relevantes en los sistemas autoconstruidos.*



Fuente: elaboración propia.

**Tabla 2**  
*Problemas estructurales que conlleva la autoconstrucción*

<b>Problema Estructural</b>	<b>Descripción</b>
<b>Inadecuada planificación y diseño estructural</b>	La autoconstrucción suele carecer de una planificación y diseño estructural adecuados, lo que resulta en edificaciones con sistemas estructurales débiles o ineficientes para resistir las fuerzas sísmicas. La falta de cálculos y análisis estructurales formales aumenta la vulnerabilidad ante los terremotos.
<b>Uso de materiales no adecuados</b>	La falta de acceso a materiales de construcción de calidad y la búsqueda de opciones económicas llevan a la utilización de materiales no adecuados para la construcción, como ladrillos de baja resistencia, concreto de mala calidad y refuerzos inadecuados. Estos materiales tienen una menor capacidad para resistir fuerzas sísmicas, aumentando la vulnerabilidad de las edificaciones.
<b>Falta de mano de obra calificada</b>	La autoconstrucción a menudo implica la participación de personas sin experiencia ni capacitación en técnicas de construcción seguras y eficientes. Esto puede resultar en errores durante la construcción, como mala colocación de refuerzos, juntas mal selladas y conexiones estructurales deficientes, aumentando la vulnerabilidad estructural.
<b>Deficiente conexión entre elementos estructurales</b>	La falta de conexión adecuada entre elementos estructurales, como muros, vigas y columnas, puede resultar en una distribución desigual de las cargas durante un sismo. Esto puede provocar puntos débiles en la estructura y aumentar el riesgo de colapso, especialmente en áreas con alta amenaza sísmica.
<b>Ausencia de sistemas de aislamiento sísmico</b>	La falta de sistemas de aislamiento sísmico adecuados, como juntas sísmicas y dispositivos de amortiguación, dificulta la capacidad de las edificaciones para disipar la energía sísmica y reducir las fuerzas transmitidas a la estructura. Esto aumenta el riesgo de daños estructurales y colapso durante un terremoto.
<b>Construcción en zonas de riesgo geológico</b>	La autoconstrucción frecuentemente ocurre en zonas de riesgo geológico, como laderas inestables o áreas propensas a deslizamientos de tierra. Estas áreas están expuestas a amenazas naturales adicionales, como movimientos de tierra, lo que aumenta significativamente el riesgo de daños y colapso estructural durante un evento sísmico.
<b>Falta de cumplimiento de normativas de construcción</b>	La autoconstrucción rara vez cumple con las normativas de construcción y los códigos de edificación establecidos para garantizar la seguridad estructural. La falta de adherencia a estos estándares aumenta la vulnerabilidad de las edificaciones ante eventos sísmicos y reduce su capacidad de resistir fuerzas extremas.
<b>Pobre capacidad de respuesta y recuperación</b>	Las construcciones autoconstruidas tienen una baja capacidad de respuesta y recuperación frente a eventos sísmicos. La falta de diseño y planificación adecuados dificulta la implementación de medidas de mitigación y la recuperación rápida después de un terremoto, lo que prolonga la vulnerabilidad de las comunidades afectadas.

Fuente: Elaboración Propia

#### **D. Principales deficiencias en la autoconstrucción de viviendas**

Los problemas estructurales subrayan los desafíos significativos que enfrentan las edificaciones autoconstruidas en áreas con amenaza sísmica media y alta, exposición al riesgo y limitada resiliencia. La combinación de factores como la falta de planificación, el uso de materiales inadecuados y la ausencia de mano de obra calificada aumenta la vulnerabilidad de estas construcciones y las expone a un mayor riesgo de daños y colapso durante eventos sísmicos. Los problemas estructurales mencionados en la tabla 2, resaltan la complejidad inherente a las edificaciones autoconstruidas, especialmente en entornos con amenaza sísmica media y alta, así como una exposición significativa al riesgo sísmico y una resiliencia limitada. Estos desafíos no solo afectan la estabilidad de las estructuras, sino que también tienen implicaciones en la seguridad y el bienestar de las comunidades que las habitan.

En primer lugar, la falta de planificación adecuada es uno de los principales obstáculos que enfrentan las construcciones autoconstruidas. La planificación estructural requiere una evaluación detallada de las cargas sísmicas esperadas, así como un diseño cuidadoso de los sistemas de soporte y de resistencia (González et al., 2010). Sin embargo, en muchas ocasiones, esta etapa crucial se pasa por alto o se realiza de manera insuficiente, lo que resulta en estructuras vulnerables que no pueden resistir adecuadamente las fuerzas sísmicas. Una forma de cuantificar la capacidad de una estructura para resistir las fuerzas sísmicas es a través del cálculo de su periodo fundamental de vibración ( $T$ ) (Goel & Chopra, 2004a). Este parámetro se define como el tiempo necesario para que una estructura complete un ciclo completo de oscilación cuando se la excita con una fuerza externa. El periodo fundamental está influenciado por varios factores, como la rigidez y la masa de la estructura. La falta de planificación adecuada puede llevar a una subestimación de la rigidez estructural y, por lo tanto, a una estimación incorrecta del periodo fundamental, lo que resulta en una vulnerabilidad sísmica aumentada. Además, el uso de materiales inadecuados también contribuye significativamente

a la vulnerabilidad de las edificaciones autoconstruidas. La resistencia y la ductilidad de los materiales de construcción son factores críticos para garantizar la estabilidad estructural durante un evento sísmico. Por ejemplo, el concreto de baja resistencia puede experimentar un colapso prematuro bajo cargas sísmicas, mientras que los ladrillos de baja calidad pueden fracturarse fácilmente, comprometiendo la integridad de la estructura.

Una manera de evaluar la resistencia de un material de construcción es a través de su resistencia a la compresión ( $f_c$ ) (ACI Committee, 2008). Esta propiedad indica la capacidad del material para resistir fuerzas de compresión antes de experimentar una falla. Una resistencia a la compresión insuficiente puede hacer que un material falle bajo cargas sísmicas, aumentando así el riesgo de colapso de la estructura. Por último, la ausencia de mano de obra calificada es otro factor crucial que contribuye a la vulnerabilidad de las construcciones autoconstruidas. La experiencia y el conocimiento técnico son fundamentales para garantizar una construcción segura y resistente a los sismos (González et al., 2011). La falta de capacitación adecuada puede dar lugar a errores durante la construcción, como la mala colocación de refuerzos estructurales o la conexión inadecuada entre elementos, lo que aumenta aún más la vulnerabilidad de la estructura. Finalmente, la falta de planificación, el uso de materiales inadecuados y la ausencia de mano de obra calificada son factores clave que contribuyen a la vulnerabilidad de las edificaciones autoconstruidas frente a eventos sísmicos. La comprensión y la consideración de estos factores son esenciales para abordar los desafíos significativos que enfrentan estas construcciones y mejorar su capacidad de resistir y recuperarse de los efectos de los terremotos.

### ***2.1.2. Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico***

La vulnerabilidad sísmica, definida como la predisposición inherente de una estructura, un conjunto de edificaciones o una zona urbana a sufrir daños significativos durante un sismo, está profundamente influenciada por las características físicas y de diseño estructural

(Aroquipa et al., 2023a; Aroquipa et al., 2023b; Barbat & Pujades, 1998). Alas Fernández & Grijalva Portal (2018) destacan que en las últimas décadas se han desarrollado metodologías que permiten cuantificar de manera precisa los daños estructurales asociados a eventos sísmicos. Estos avances han dado lugar a la formulación de índices de riesgo sísmico y evaluaciones de vulnerabilidad, herramientas clave para medir el impacto potencial en elementos y sistemas estructurales completos (Kassem et al. 2020).

#### **2.1.2.1. Enfoque de Evaluación Empírica.**

##### ***a. Métodos de evaluación de detección visual rápida.***

Existen varios métodos para la evaluación rápida de la vulnerabilidad sísmica, siendo el método de inspección visual uno de los enfoques más simples y ampliamente utilizados. Este método, conocido como Cribado Visual Rápido (RVS, por sus siglas en inglés), permite una estimación cualitativa de la vulnerabilidad estructural a través de observaciones externas del edificio, sin necesidad de acceder al interior. Este procedimiento puede completarse en menos de 30 minutos, como lo destacan (Perrone et al., 2015). En Estados Unidos, la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) ha desarrollado múltiples guías, entre ellas FEMA 310 y FEMA 154 (Agency, 2006), que establecen procedimientos para la evaluación de riesgos y adaptación de edificios. Según FEMA (2015) el método de detección en la calle, también conocido como RVS, constituye el primer paso en la evaluación antes de proceder con análisis más detallados. Este método clasifica los edificios según los materiales de construcción y sus sistemas estructurales, utilizando técnicas de inspección desde la acera para evaluar parámetros clave y calcular el puntaje de desempeño estructural básico, lo cual determina las prioridades de riesgo.

Wallace & Miller, (2008) aplicaron el procedimiento RVS sugerido por FEMA 154 a 1075 edificios en el oeste de Oregón, identificando el potencial impacto de los peligros

sísmicos en instalaciones públicas. De manera similar, Holmes (2010) utilizó técnicas de detección rápida para evaluar edificios en Estados Unidos que mostraban un desempeño sísmico deficiente debido a un diseño inadecuado. Este enfoque ha sido adoptado y desarrollado en otros países como Canadá, Japón, Turquía, Grecia, Nueva Zelanda e India. En Canadá, el Consejo Nacional de Investigación (NRC) introdujo un procedimiento de cribado sísmico que establece el Índice de Prioridad Sísmica (SPI), el cual resulta de la suma de los índices estructurales (SI) y no estructurales (NSI). Este índice clasifica los edificios en tres niveles de evaluación: "bajo" para SPI menor a 10, "medio" para SPI entre 10 y 20, y "alto" para SPI superior a 20, (Cheung et al., 2000; Saatcioglu et al., 2013)

En Japón, el enfoque del índice sísmico se estructura en tres etapas de evaluación. La primera etapa cuantifica la resistencia a la compresión de los elementos verticales bajo carga sísmica lateral. La segunda etapa evalúa la capacidad sísmica considerando la ductilidad y resistencia de estos elementos. La tercera etapa integra la resistencia y ductilidad de los elementos tanto verticales como horizontales (columnas, muros y vigas) para evaluar el desempeño estructural durante los sismos. El índice de la estructura ( $I_S$ ) se calcula con base en el producto de la estructura básica ( $E_0$ ) por el índice de irregularidad ( $S_D$ ), así como el tiempo o índice de deterioro (T) como se muestra en la Ec. (4) – anexo 04. Una vez que se ha determinado el Índice de Desempeño Sísmico ( $I_S$ ), se debe comparar con el Índice de Juicio Sísmico ( $I_{S0}$ ) para clasificar la estructura como adecuada o no frente a fuerzas sísmicas (Albuquerque, s.f.; Otani, 2000).

En Turquía, Hassan & Sozen (1997) desarrollaron un índice de prioridad para cada edificio basado en el índice de columna (CI), definido como la relación entre el área de la columna y el área del piso, y el índice de pared (WI), que relaciona el área de corte de las paredes de relleno con el área del piso. Además, se ha propuesto una metodología que evalúa la vulnerabilidad sísmica en función de propiedades del material, sistema de resistencia lateral,

irregularidades en la planta y la altura, y condiciones de la cimentación. Bal & Tezcan (2008) desarrollaron el método de puntuación P25, que clasifica edificios vulnerables al colapso, basado en parámetros como la calidad del material, la corrosión del acero, irregularidades, condiciones del terreno y sismicidad. Este método, que se basa en datos de 323 edificios que sufrieron diferentes niveles de daño en sismos alrededor del mundo, otorga puntuaciones que varían de P1 a P7, de 0 a 100, para evaluar diferentes modos de falla. Los métodos utilizados en Turquía se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 3**

*Índices de detección in-situ (método turco).*

Método	Índice	Ecuación
RVS	Índice de prioridad	$PI = CI + WI$
RVS	Índice de capacidad	$CPI = C_A \times C_M \times B \times \mathcal{A}$
RVS	Índice de puntuación de rendimiento	$P = \alpha \times \beta \times P_{min}$

\* CI: Índice de columna, WI: Índice de pared,  $C_A$  y  $C_M$  son factores de coeficientes que reflejan las características arquitectónicas,  $\alpha$  y  $\beta$  son factores de corrección,  $P_{min}$ : puntaje de desempeño más pequeño.

**b. Método del índice de vulnerabilidad.**

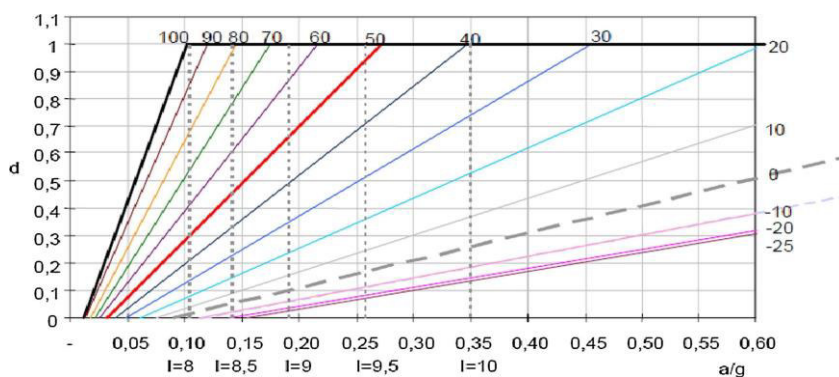
**☒ Enfoque GNDT**

En las últimas décadas, Italia ha desarrollado metodologías de índice de vulnerabilidad a través del "Grupo Nacional de Defensa frente a Sismos" (GNDT), clasificadas en dos niveles (Giovinazzi & Lagomarsino, 2002). El "GNDT nivel I" categoriza los edificios en clases de vulnerabilidad (A, B y C), mientras que el "GNDT nivel II" según Benedetti & Petrini, (1984); Duilio Benedetti, Benzoni, & Parisi, (1988); Terremoti, (1993), requiere la recopilación de datos detallados de encuestas de daños para entender los factores que influyen en la vulnerabilidad estructural, como el diseño, la zapata, el tipo y la calidad de materiales. Once

parámetros se evalúan y se asignan a clases de vulnerabilidad (A, B, C y D), ponderados según su importancia. Estos datos se integran para calcular el índice de vulnerabilidad ( $I_v$ ), que clasifica el daño potencial de un edificio durante un sismo, utilizando la ecuación 06 del anexo 04 para estimar la vulnerabilidad sísmica global de cada estructura.

**Figura 3**

*Factor de daño de sistemas estructurales*



Fuente: (Benedetti & Petrini, 1984)

En el segundo nivel del método GNDT, se aplicó una metodología similar para edificios de concreto reforzado (RC), pero con pesos de parámetros uniformes. Estos parámetros identificaron deficiencias estructurales mediante observaciones visuales de expertos. Además, se propusieron clases de vulnerabilidad, desde "A" (menos vulnerable) hasta "C" (más vulnerable). Los índices de vulnerabilidad de edificios RC pueden ajustarse para ser equivalentes a los de mampostería, facilitando la comparación entre ambos tipos de estructuras.

### ☑ Enfoque macrosísmico europeo (EMS) (RISK-UE)

El proyecto RISK-UE, financiado por la Unión Europea, fue desarrollado para evaluar la vulnerabilidad sísmica en Europa, dado que no existía un sistema unificado en la región. Este enfoque surgió en respuesta a los efectos sísmicos en Turquía, Atenas y Grecia. Como parte del proyecto, se introdujo el método del Índice de Vulnerabilidad (VIM), que se aplicó con

éxito en siete ciudades europeas (Milutinovic & Trendafiloski, 2003). El método clasifica los edificios en seis clases de vulnerabilidad (de A a F) y en cuatro tipologías generales: mampostería, concreto armado, acero y madera. Además, categoriza el daño en cinco grados, desde daños leves ( $D_1$ ) hasta colapso total ( $D_5$ ). Esta metodología fue diseñada específicamente para evaluar las construcciones existentes en el contexto europeo (Lagomarsino & Giovinazzi, 2006).

**Tabla 4**

*Clases de construcción de mampostería y peso relativo de cada parámetro*

Número	Parámetros	Clases de $K_i$				Peso
		A	B	C	D	$W_i$
1	Tipo y organización del sistema de resistencia	0	5	20	45	1,00
2	Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0,25
3	Fuerza agregada	0	5	25	45	1,5
4	Ubicación y cimientos del edificio	0	5	15	45	0,75
5	Diafragmas elementos horizontales	0	5	25	45	Variable
6	Configuración del diseño del plan	0	5	25	45	0,5
7	Configuración en altura y elevación	0	5	25	45	Variable
8	Distancia óptima entre paredes	0	5	25	45	0,25
9	Techo	0	5	25	45	Variable
10	Elementos no estructurales (NS)	0	5	25	45	0,25
11	Condiciones particulares de mantenimiento	0	5	25	45	1,00

Fuente: (Aroquipa, 2024)

### 2.1.3. Daños físicos en Sistemas Estructurales

#### 2.1.3.1. Índice de Daño.

El índice de daño para edificaciones es una medida cuantitativa que se utiliza para evaluar el grado de deterioro o afectación que una estructura ha experimentado debido a la acción de cargas, como fuerzas sísmicas. Este índice integra diferentes factores como deformaciones, desplazamientos, y acumulación de daños en los materiales estructurales, proporcionando un valor que refleja la severidad del daño. Un índice de daño típico varía entre 0 y 1, donde 0 indica que la estructura no ha sufrido daño y 1 indica un colapso total o falla estructural significativa (Tang & Ang, 2007). Este índice es crucial para determinar la seguridad, funcionalidad y necesidad de reparación o reforzamiento de las edificaciones después de un evento sísmico o cualquier otro tipo de carga extrema (Park et al., 1985; Yamin, 2015).

**Tabla 5**

*Niveles de daño según el índice de Park*

<b>Estado de daño</b>	<b>Rango para el índice</b>
Menor	0.1 - 0.2
Moderado	0.2 - 0.5
Severo	0.5 - 1.0
Colapso	> 1.0

Fuente: (Y.-J. Park et al., 1985)

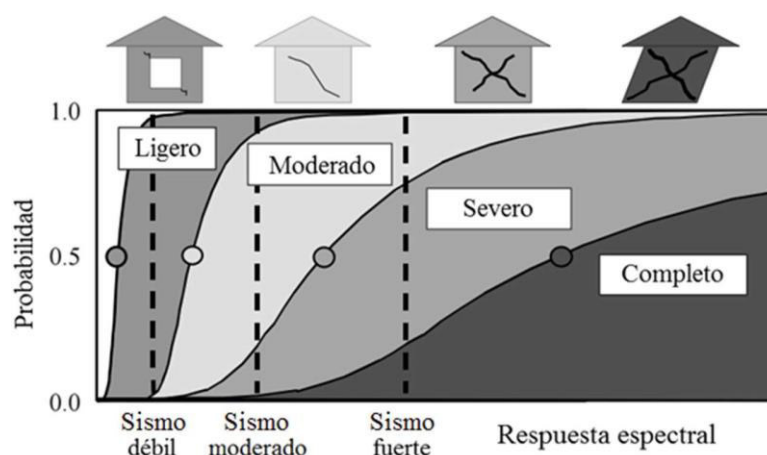
### **2.1.3.2. Función de Fragilidad.**

Según Yamin (2015) establece que: Una función de fragilidad es una herramienta probabilística utilizada en ingeniería estructural para describir la probabilidad de que una estructura o sus componentes excedan un determinado nivel de daño bajo la acción de una carga sísmica específica. Estas funciones se expresan generalmente como curvas que relacionan la intensidad del evento sísmico, como la aceleración del terreno o la demanda de desplazamiento, con la probabilidad de que la estructura alcance o supere un estado de daño predefinido fragilidad (Singhal & Kiremidjian, 1996; Tang & Ang, 2007).

En esencia, la función de fragilidad evalúa la vulnerabilidad de una estructura frente a distintos niveles de excitación sísmica, permitiendo a los ingenieros y planificadores urbanos estimar las consecuencias potenciales de un terremoto en términos de daño estructural (ATC, 1996). Estas funciones son fundamentales en el análisis de riesgo sísmico y en la toma de decisiones para la gestión y mitigación de desastres (FEMA, 2003).

**Figura 4**

*Ejemplo típico de funciones de fragilidad*



Fuente: adaptado de (FEMA, 2003)

#### **2.1.4. Acción Sísmica para el Análisis de Respuesta Dinámica**

##### **2.1.4.1. Análisis Estático no Lineal (NLSA) - Análisis Pushover (POA).**

El Análisis Estático no Lineal (NLSA), también conocido como Análisis Pushover (POA), es un método ampliamente utilizado en ingeniería estructural para evaluar la respuesta de edificaciones ante cargas sísmicas extremas. Este procedimiento implica la aplicación de fuerzas laterales incrementales a una estructura, lo que permite desarrollar una "Curva de Capacidad" que describe la relación entre la fuerza aplicada (corte basal) y el desplazamiento estructural. Esta curva es fundamental para determinar las propiedades dinámicas de la estructura, tales como rigidez, resistencia y ductilidad. El Análisis Pushover se basa en un

modelo estructural que incorpora explícitamente el comportamiento no lineal de los elementos, lo que permite evaluar el desplazamiento y la fuerza hasta que la estructura alcanza un estado de falla o un desplazamiento máximo predefinido, conocido como desplazamiento objetivo. Una falla global en la estructura puede ocurrir cuando la pendiente de la Curva de Capacidad se vuelve negativa, indicando un punto crítico en el comportamiento estructural.

Este enfoque es particularmente útil para identificar puntos de debilidad en la estructura y predecir su comportamiento inelástico, lo que es esencial para evaluar su capacidad de resistir un sismo severo. Aunque el análisis se realiza sobre sistemas de múltiples grados de libertad (MDOF), estos se simplifican a un sistema de un grado de libertad (SDOF) para facilitar el proceso. No obstante, esta simplificación es precisa únicamente si la estructura mantiene una forma de deformación constante durante la vibración sísmica. El método se presentó inicialmente en FEMA 273 (Agency, 1997; FEMA, 1997) con el uso del "Método de coeficiente" para determinar el desplazamiento objetivo y fue actualizado en FEMA 356 (P. FEMA, 2000), siendo hoy en día una herramienta clave en la ingeniería sísmica para estimar la seguridad estructural frente a colapsos inducidos por sismos (Aroquipa & Yamin, 2016; Barbat et al., 2015; Bedoya-Ruiz et al., 2015; Belejo & Bento, 2016; Jan et al., 2004; Peralta Álvarez et al., 2012).

**Tabla 6.***Métodos de pushover modificados y sus propósitos*

<b>Método Pushover modificado</b>	<b>Propósito</b>	<b>Referencias</b>
Análisis pushover modal (MPA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proveer la capacidad de considerar la contribución de todos los modos de vibración que afectan significativamente la respuesta sísmica, especialmente en estructuras de gran altura.</li> </ul>	(Chopra & Goel, 2002)
Análisis pushover modal modificado (MMPA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El MPA ha sido extendido para evaluar la demanda sísmica considerando la influencia de los modos superiores en la altura de la edificación.</li> </ul>	(Chopra & Chintanapakdee, 2004)
Análisis pushover modal adaptativo (AMPA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redistribuir las fuerzas de inercia asociadas con los cambios en las características dinámicas durante la respuesta inelástica, además de tener en cuenta la influencia de los modos superiores.</li> </ul>	(Antoniou & Pinho, 2004; Gupta & Kunnath, 2000; Kalkan & Kunnath, 2006)
Análisis pushover modal consecutivo (CMP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la demanda sísmica en edificios altos, considerando el comportamiento sísmico de diferentes modos y aplicando consecutivamente el vector de fuerza correspondiente a cada modo en la estructura.</li> </ul>	(Poursha et al., 2009)
Análisis pushover modal consecutivo modificado (MCMP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El CMP ha sido ampliado para estimar la demanda sísmica teniendo en cuenta las consecuencias de los modos superiores y la torsión.</li> </ul>	(Khoshnoudian & Kiani, 2012; Poursha et al., 2011)
Método extendido de N2	<ul style="list-style-type: none"> <li>☐ Considerar los efectos de los modos torsionales y superiores.</li> </ul>	(Baker, 2007; Brozovič & Dolšek, 2014; Kreslin & Fajfar, 2012)
Análisis pushover de modelos mejorado (IMPA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El IMPA es un enfoque multimodal que permite redefinir las cargas laterales y calcular la forma deformada inelástica en lugar de la forma deformada elástica.</li> </ul>	(Belejo & Bento, 2016; Poursha & Samarin, 2015)
Análisis pushover mejorado del límite superior (IUB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El IUB propuso un ajuste en el patrón de carga lateral aplicado a edificios altos, mejorando la precisión en la evaluación de la respuesta sísmica de estas estructuras.</li> </ul>	(Rahmani et al., 2018)
Análisis Pushover basado en espectro (SPA).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El procedimiento SPA permite estimar la demanda sísmica en edificios altos de manera rápida y precisa, alcanzando una precisión casi comparable a la del análisis dinámico no lineal (NTHA)</li> </ul>	(Liu & Kuang, 2017)

Fuente: (Aroquipa, 2022, 2024).

El procedimiento de análisis estático no lineal (NLSA) ha mostrado algunas deficiencias en su fundamentación teórica. Inicialmente, se basaba en dos suposiciones: que las respuestas estructurales eran dominadas por el modo de vibración fundamental y que el vector de desplazamiento permanecía constante (Zhang et al., 2017). Sin embargo, estos supuestos no siempre son correctos, y la respuesta no lineal de las estructuras puede no estar representada adecuadamente por el primer modo de vibración o por fuerzas laterales distribuidas de manera constante (triangular o rectangular) a lo largo de la altura de la estructura (Miranda, 1999). Además, el método no consideraba la duración, las influencias cíclicas y las características dinámicas de la estructura, lo que ha llevado a que algunos investigadores encuentren que los resultados obtenidos no son tan precisos como los obtenidos a través del análisis histórico de tiempo no lineal (NLTHA) o en pruebas experimentales del comportamiento sísmico.

A pesar de estas limitaciones, el método se ha utilizado en diversos estudios para evaluar la capacidad estructural. Reconociendo sus deficiencias, se han desarrollado modificaciones al análisis estático no lineal para mejorar la estimación de la demanda sísmica (Zhang et al., 2017), incorporando factores como la contribución de modos superiores, efectos de torsión, redistribución de fuerzas de inercia y la consideración de estructuras irregulares (Chopra & Chintanapakdee, 2004; Goel & Chopra, 2004a, 2004b; Gupta & Kunnath, 2000; Lee & Foutch, 2002). Entre los procedimientos modificados se encuentran el Análisis Pushover Modal (MPA), el Análisis de Pushover Modal Modificado (MMPA), el Análisis Pushover Modal Adaptativo (AMPA), el Pushover Modal Consecutivo (CMP) y su versión modificada (MCMP), el procedimiento extendido N2, el Pushover basado en etapas, y el Análisis Pushover Modal Mejorado (IMPA). Además, Liu y Kuang (2017) propusieron el Análisis Pushover basado en el espectro (SPA) para evaluar la demanda sísmica en edificios altos, demostrando una buena concordancia con los resultados del NLTHA. Asimismo, Rahmani, Bourahla, Bento,

& Badaoui, (2018) desarrollaron un procedimiento estático no lineal llamado Análisis de Transferencia de Límite Superior Mejorado (IUB), diseñado para ofrecer mayor precisión en el análisis de edificios altos irregulares.

#### **2.1.4.2. Análisis Tiempo Historial No Lineal - IDA.**

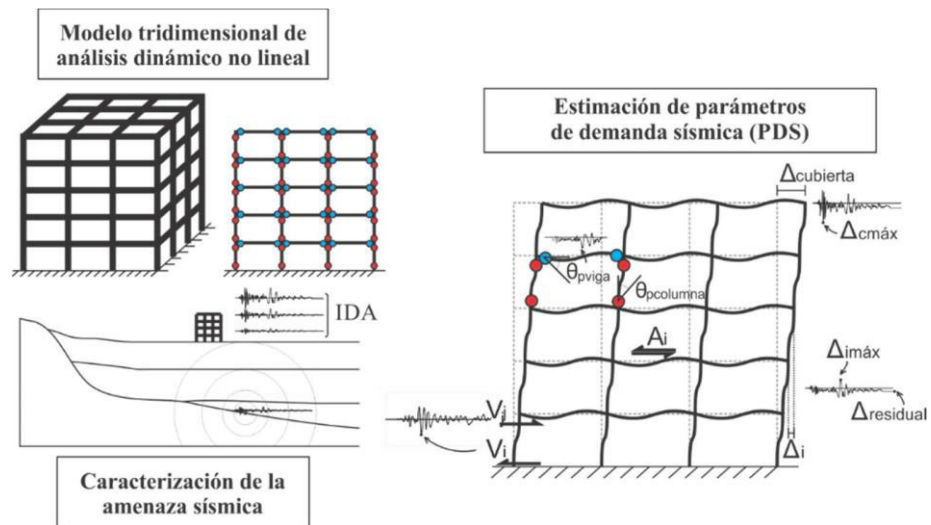
El Análisis Tiempo Historia No Lineal (NLTHA), también conocido como Análisis Dinámico Incremental (IDA, por sus siglas en inglés), es un método avanzado y altamente preciso utilizado en la ingeniería estructural para evaluar el comportamiento sísmico de estructuras bajo condiciones dinámicas. Este enfoque implica la aplicación de una serie de registros sísmicos incrementales a un modelo estructural no lineal, aumentando gradualmente la intensidad del sismo hasta que la estructura alcanza un estado de daño significativo o incluso el colapso. Donde, Propuesto inicialmente por Bertero (1977) y desarrollado en profundidad por varios investigadores (Bazzurro et al., 1998; Bazzurro & Cornell, 1994; Jalayer et al., 2015; Lin & Baker, 2013; Vamvatsikos & Allin Cornell, 2002; Yun et al., 2002), el IDA permite trazar una curva que relaciona la respuesta estructural, como desplazamientos o fuerzas internas, con la intensidad sísmica aplicada. Esta curva proporciona una visión detallada del rendimiento inelástico de la estructura a lo largo de diferentes niveles de demanda sísmica, siendo particularmente útil para identificar puntos de falla, evaluar la capacidad estructural y determinar los márgenes de seguridad frente a eventos sísmicos extremos (Lin & Baker, 2013).

El IDA también fue aprobado por FEMA (2000) como una técnica para evaluar la capacidad de colapso global de las estructuras. Este método permite una comprensión detallada del comportamiento estructural, desde la respuesta elástica hasta la no lineal y la eventual inestabilidad de la estructura. El análisis se lleva a cabo considerando el comportamiento no lineal de los materiales y los efectos acumulativos de las cargas cíclicas, lo que lo convierte en una herramienta precisa para predecir el desempeño de la estructura durante su vida útil, especialmente en regiones propensas a terremotos. En la práctica, el IDA requiere un conjunto

de registros de movimiento del suelo basados en NLTHA, en los cuales la intensidad del movimiento sísmico se incrementa gradualmente hasta que la estructura alcanza su capacidad de colapso global (Lin & Baker, 2013). En las últimas décadas, este método se ha convertido en una herramienta central en la investigación del comportamiento sísmico de las estructuras, como se resume en diversos estudios que han aplicado NLTHA e IDA para mejorar la comprensión de la respuesta estructural frente a terremotos (Lin & Baker, 2013).

**Figura 5**

*Diagrama - proceso de análisis no lineal.*



Fuente: (Yamín Lacouture, 2016)

**Tabla 7.**  
Resumen de estudios previos sobre (NLTHA) - (IDA)

Autores	Destacado del estudio	Medida de intensidad (IM)	Parámetro de demanda de ingeniería (EDP)	Software
<b>Vamvatsikos</b> (Vamvatsikos & Cornell, 2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se desarrollaron curvas IDA para analizar la respuesta estructural de un sistema espacial de acero de 20 pisos sometido a un conjunto de registros sísmicos.</li> </ul>	Sa (T1,5%), g	Relación de deriva entre pisos $\theta_{max}$	OpenSees
<b>Kirçil y Polat</b> (Serdar Kirçil & Polat, 2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se desarrollaron curvas IDA para edificios de concreto armado de 3, 5 y 7 pisos ubicados en Estambul, Turquía.</li> </ul>	Sa (T1,5%), g	Relación de deriva entre pisos	IDARC
<b>Asgarian et al.</b> (Asgarian et al., 2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se investigó el comportamiento sísmico de tres tipos de uniones viga-columna en un sistema estructural de acero resistente a momentos, específicamente en uniones especiales, intermedias y ordinarias.</li> </ul>	Sa (T1,5%), g	Relación de deriva entre pisos $\theta_{max}$	OpenSees
<b>Farsangi et al.</b> (Farsangi et al., 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se evaluó la fiabilidad sísmica de una estructura de acero en regiones con alta actividad sísmica.</li> </ul>	PGA	Relación de deriva entre pisos $\theta_{max}$	OpenSees
<b>Fanaie y Ezzatshoar</b> (Fanaie & Ezzatshoar, 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se estudiaron las propiedades dinámicas de un sistema de arriostramiento de acero concéntrico, conocido como sistema de arriostramiento de puerta.</li> </ul>	Sa (T1,5%), g	Relación de deriva entre pisos $\theta_{max}$	OpenSees
<b>Nazri y Saruddin, Saruddin y Nazri</b> (Nazri & Saruddin, 2015; Nur et al., 2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se utilizaron curvas IDA para evaluar el comportamiento sísmico de edificios de baja y media altura en Malasia.</li> </ul>	PGA	Deriva (%)	SAP2000
<b>Farsangi y Tasnimi</b> (Farsangi & Tasnimi, 2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se estudió la influencia de las excitaciones sísmicas horizontales y verticales combinadas en estructuras de marcos de concreto reforzado (RC) no dúctiles.</li> </ul>	Sa (T1,5%), g	Relación de deriva entre pisos $\theta_{max}$	OpenSees

Fuente: (Aroquipa, 2022, 2024).

El método IDA (Incremental Dynamic Analysis) ofrece varias ventajas en la evaluación del comportamiento sísmico de estructuras. A continuación, se destacan algunas de las principales (Bakhshi & Asadi, 2013; Gonzalez, Roca, & Centro Internacional de Metodos Numericos en Ingenieria-CIMNE, 1998; Krawinkler, Medina, & Alavi, 2003; Shome, 1999; Access, 2018; Azizan et al., 2018; Kildashti et al., 2018; Moazam et al., 2018):

**Evaluación Detallada del Comportamiento Inelástico:** El IDA permite una comprensión profunda del comportamiento estructural más allá de la elasticidad, capturando la respuesta inelástica y los posibles modos de falla de la estructura bajo cargas sísmicas incrementales.

**Identificación de Puntos de Falla:** Este método facilita la identificación de los puntos críticos de falla o colapso en una estructura, lo que es esencial para diseñar estrategias de mitigación y reforzamiento.

**Capacidad de Análisis para Diferentes Niveles de Demanda Sísmica:** El IDA proporciona una visión completa del rendimiento estructural a través de una gama de intensidades sísmicas, permitiendo evaluar cómo la estructura responde a diferentes niveles de demanda.

**Curvas de Desempeño Personalizadas:** Genera curvas IDA específicas para la estructura analizada, lo que permite evaluar su desempeño bajo escenarios sísmicos variados y predecir su comportamiento durante eventos reales.

**Integración de Registros Sísmicos Reales:** El IDA utiliza registros sísmicos reales, lo que permite que las simulaciones reflejen más fielmente las condiciones a las que podría estar sometida la estructura durante un sismo.

**Adaptabilidad a Diferentes Tipos de Estructuras:** El método es aplicable a una amplia variedad de tipos de estructuras y materiales, lo que lo hace una herramienta versátil en la ingeniería sísmica.

**Aproximación a la Realidad:** Al incrementar gradualmente la intensidad sísmica en las simulaciones, el IDA simula más de cerca cómo una estructura podría comportarse en la vida real, desde el inicio del evento sísmico hasta el colapso.

**Comparación con Métodos Convencionales:** Proporciona una base sólida para comparar los resultados con otros métodos de análisis, como el análisis estático no lineal, ayudando a validar o cuestionar los enfoques tradicionales.

Estas ventajas hacen que el método IDA sea una herramienta poderosa y preferida para el análisis sísmico detallado de estructuras, especialmente en el contexto de diseño de estructuras críticas o en áreas de alta actividad sísmica (Colapietro et al., 2014; Farsangi et al., 2014, 2016).

### ***2.1.5. Curva analítica de Vulnerabilidad / Fragilidad***

Tradicionalmente, las curvas de vulnerabilidad se derivaban de datos observacionales de daños previos, pero con los avances en análisis computacionales, ahora es más accesible desarrollar estas curvas. Estas curvas, conocidas también como curvas de fragilidad, se emplean para evaluar analíticamente el riesgo sísmico en estructuras y son herramientas valiosas para predecir posibles daños que podrían afectar a las edificaciones. Además, sirven como indicadores clave en la planificación de proyectos de rehabilitación y remodelación. Dado el impacto catastrófico de los sismos y los movimientos del suelo en las estructuras, combinar el análisis de fragilidad con análisis no lineales se considera la mejor estrategia para estimar las respuestas estructurales y las pérdidas económicas (Ahmad et al., 2011; Hajimehrabi et al., 2019; Özel & Güneyisi, 2011; Ozmen et al., 2010; Pnevmatikos et al., 2019;

Polese et al., 2008; Saloustros et al., 2019). En los últimos años, las estructuras prefabricadas de concreto armado han recibido considerable atención (Ahmad et al., 2019; Babič & Dolšek, 2016; Banerjee et al., 2016; Batalha et al., 2019; Beilic et al., 2017; Casotto et al., 2015; Senel & Kayhan, 2010). Por tanto, estas curvas son cruciales tanto antes como después de un sismo y en la actualización de normativas futuras.

### ***2.1.6. Resiliencia Sísmica y las Pérdidas Económicas.***

Las comunidades enfrentan un aumento en la frecuencia y magnitud de desastres naturales como tsunamis, sismos y tormentas, lo que hace crucial la evaluación tanto cuantitativa como cualitativa de la vulnerabilidad de las estructuras. Cimellaro et al. (2010) la resiliencia de infraestructuras y estructuras esenciales es un área de creciente interés en la ingeniería civil. Evaluar el riesgo sísmico a gran escala es vital para la planificación y mitigación en áreas urbanas. La resiliencia, que implica la capacidad de las sociedades para reducir peligros y recuperarse rápidamente, ha sido ampliamente estudiada, con énfasis en desarrollar métodos para cuantificarla. Varios investigadores, como Cimellaro y sus colegas, han trabajado en la cuantificación de la resiliencia sísmica de infraestructuras críticas como hospitales.

Por ejemplo, Cimellaro desarrolló un modelo para evaluar la resiliencia de sistemas hospitalarios en situaciones extremas (Chieffo et al., 2019). Otros estudios han explorado la diferencia entre resiliencia y fiabilidad sísmica, la predicción de la resiliencia de puentes mediante métodos probabilísticos, y el impacto del costo y tiempo de reparación en edificios con distintos sistemas de aislamiento sísmico. Investigaciones recientes también han abordado la resiliencia de estructuras de concreto armado modernizadas con refuerzos, y la mejora de la resiliencia en edificios de oficinas y puentes frente a múltiples amenazas, como sismos y erosión por inundaciones (Tirca et al., 2016). Estos estudios destacan la importancia de

optimizar el diseño y reacondicionamiento de infraestructuras para aumentar su capacidad de recuperación ante desastres (Corotis, 2011).

#### **2.1.6.1. Método de Estimación de Resiliencia Sísmica.**

El Método de Estimación de Resiliencia Sísmica en ingeniería estructural y sísmica es un enfoque que permite evaluar la capacidad de una estructura para resistir y recuperarse de eventos sísmicos. Este método generalmente incluye varias etapas clave:

- 1) **Análisis de Peligro Sísmico:** Se estima la intensidad sísmica esperada, considerando parámetros como la aceleración máxima del suelo (PGA) y la velocidad máxima del suelo (PGV) en la ubicación de la estructura (Andrić & Lu, 2017).
- 2) **Modelado Estructural:** Se desarrolla un modelo matemático de la estructura para simular su comportamiento bajo cargas sísmicas mediante análisis como el Análisis Dinámico Incremental (IDA). Este análisis permite obtener curvas de respuesta estructural que muestran cómo la estructura responde a diferentes niveles de intensidad sísmica (D'Ayala et al., 2013; Vamvatsikos & Cornell, 2006).
- 3) **Curvas de Fragilidad:** Estas curvas se utilizan para predecir la probabilidad de que una estructura alcance diferentes niveles de daño bajo la acción de un sismo. Las curvas pueden ser empíricas, basadas en datos observacionales, o analíticas, derivadas de simulaciones y análisis estructurales (Caverzan & Solomos, 2014; Mosoarca et al., 2019).
- 4) **Curvas de Vulnerabilidad:** Las curvas de fragilidad se transforman en curvas de vulnerabilidad, las cuales representan la probabilidad de que una estructura experimente ciertos niveles de daño. Estas curvas son fundamentales para la estimación de pérdidas económicas y la evaluación del impacto de un sismo en la funcionalidad de la estructura (Caverzan & Solomos, 2014; Mosoarca et al., 2019).

- 5) **Función de Pérdida y Curvas de Funcionalidad:** La información de las curvas de vulnerabilidad se utiliza para calcular la función de pérdida, que cuantifica las pérdidas económicas potenciales. Además, se desarrollan curvas de funcionalidad que muestran la capacidad de la estructura para mantener su operatividad o recuperarse después de un evento sísmico (Caverzan & Solomos, 2014; Mosoarca et al., 2019).
- 6) **Índice de Resiliencia Sísmica:** Finalmente, la resiliencia se cuantifica mediante un índice que combina la capacidad de la estructura para resistir el sismo y su capacidad para recuperarse en un tiempo razonable. Este índice es clave para planificar intervenciones de mitigación y mejorar la resiliencia de infraestructuras críticas.

Este enfoque proporciona una evaluación integral del desempeño de estructuras frente a sismos y es crucial para el desarrollo de estrategias de mitigación y respuesta ante desastres en áreas sísmicamente activas. Tras obtener las curvas de vulnerabilidad, se derivó la función de pérdida, seguida por las curvas de funcionalidad, las cuales se describen en el contexto de la Resiliencia (Cimellaro et al., 2008; Cimellaro et al., 2010a).

**Tabla 8**

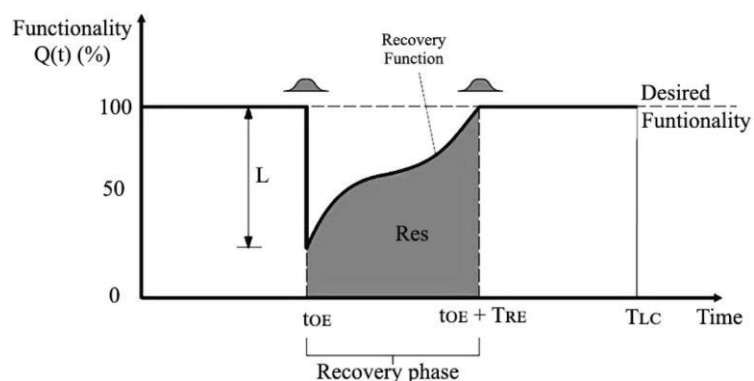
*Estados de daño y variedad de factores de daño*

<b>Estado de daño</b>	<b>Rango de factor de daño (%)</b>	<b>Factor de daño medio (%)</b>
Ninguno	0	0
Leve	0-4	2
Moderado	4-16	10
Extenso	16-84	50
Completo	100	100

Fuente: (FEMA, 2008; Sadeghi et al., 2015)

**Figura 6**

*Resiliencia sísmica - tiempo de recuperación  $T_{RE}$ .*



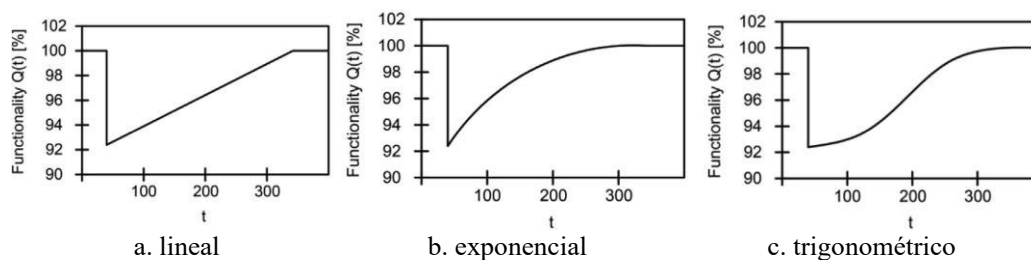
Fuente: (Caverzan & Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010b)

En la investigación de la resiliencia sísmica, se consideran tres definiciones básicas (Caverzan & Solomos, 2014; Corotis, 2011):

- **Capacidad de Resistencia:** Se refiere a la habilidad de una estructura para soportar la carga sísmica sin experimentar un daño significativo. Esto incluye la capacidad de mantener su integridad estructural durante un evento sísmico (Caverzan & Solomos, 2014; Corotis, 2011):.
- **Capacidad de Recuperación:** Esta definición abarca la habilidad de una estructura o sistema para restaurar su funcionalidad tras un evento sísmico, incluyendo la reparación de daños y la recuperación operativa en un tiempo razonable (Caverzan & Solomos, 2014; Corotis, 2011):.
- **Capacidad de Adaptación:** Se refiere a la habilidad de la estructura o comunidad para adaptarse a nuevas condiciones y mejorar su desempeño ante futuros eventos sísmicos, implementando lecciones aprendidas y nuevas tecnologías o prácticas de construcción (Caverzan & Solomos, 2014; Corotis, 2011).

## Figura 7

### *Funciones de recuperación.*



Fuente: (Caverzan & Solomos, 2014; P. G. Cimellaro et al., 2010a)

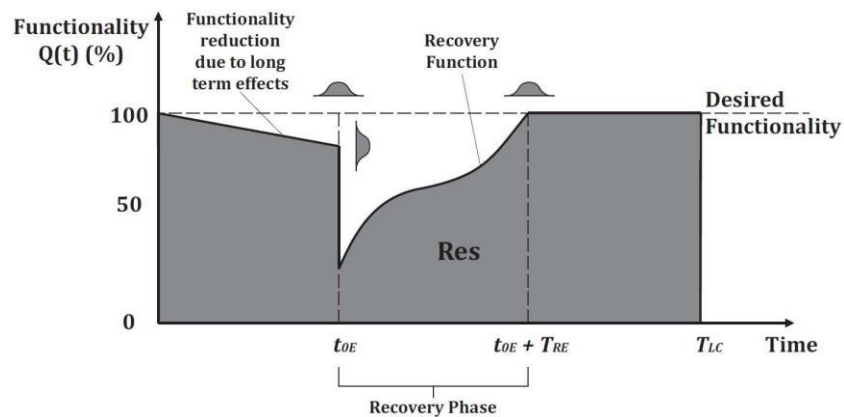
La resiliencia se puede calcular mediante la ecuación 43 del anexo 04.:

El gráfico muestra tres curvas de resiliencia que describen cómo la funcionalidad de una estructura cambia a lo largo del tiempo  $t$  después de un evento sísmico:

1. **Figura a. Lineal:** La funcionalidad se recupera de manera constante y lineal con el tiempo, mostrando una recuperación gradual y uniforme (Caverzan & Solomos, 2014; Corotis, 2011).
2. **Figura b. Exponencial:** La funcionalidad aumenta rápidamente al principio y luego se estabiliza, representando una recuperación rápida inicial seguida de una fase de estabilización (Caverzan & Solomos, 2014; Corotis, 2011).
3. **Figura c. Trigonométrica:** La funcionalidad sigue una forma de onda suavizada, indicando un proceso de recuperación con oscilaciones antes de estabilizarse en un nivel final (Caverzan & Solomos, 2014; Corotis, 2011).

**Figura 8**

*Resiliencia y los efectos de los agentes a largo plazo.*

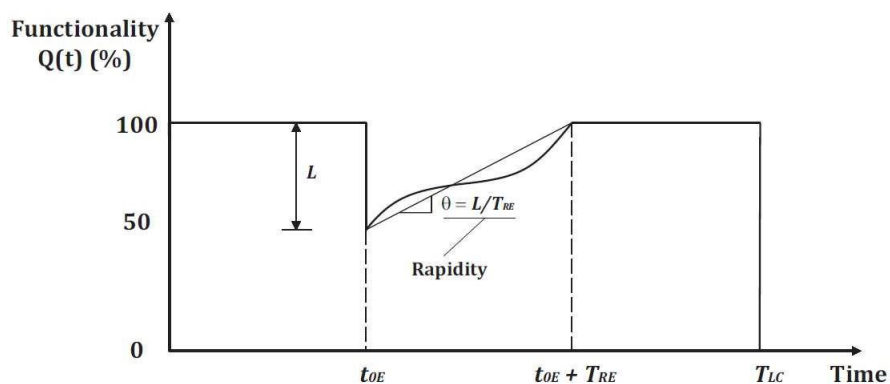


Fuente: (Solomos & Caverzan, 2014)

La resiliencia, en el contexto de la ingeniería estructural y la gestión de desastres, se puede mejorar mediante cuatro propiedades clave: rapidez, solidez, redundancia e ingenio. A continuación, se describe cada una de ellas en detalle:

**Figura 9**

*Representación esquemática del concepto de rapidez.*



Fuente: (P. G. Cimellaro et al., 2010a)

- **Rapidez:** Se refiere a la capacidad de una estructura o sistema para recuperarse rápidamente después de un evento disruptivo, como un terremoto. En términos de ingeniería, esto implica diseñar estructuras que puedan ser reparadas o que puedan

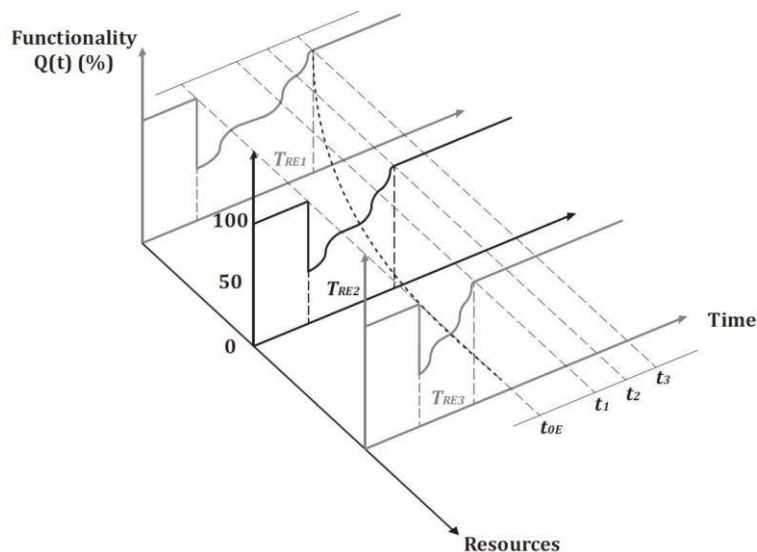
reanudar su funcionalidad en el menor tiempo posible tras el impacto. La rapidez en la recuperación es esencial para minimizar el tiempo durante el cual la infraestructura crítica no está operativa, lo que, a su vez, reduce el impacto económico y social de un desastre (Caverzan & Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010a).

- **Solidez:** La solidez hace referencia a la capacidad de una estructura para resistir un evento sísmico sin sufrir daños significativos. Esto implica que la estructura esté diseñada con materiales de alta resistencia y configuraciones estructurales que maximicen su capacidad de soportar cargas extremas. La solidez también implica la implementación de códigos de construcción rigurosos y el uso de tecnologías avanzadas que refuercen la integridad estructural frente a eventos imprevistos (Caverzan & Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010a).
- **Redundancia:** La redundancia es la propiedad que permite que un sistema continúe funcionando incluso si uno o más de sus componentes fallan. En la ingeniería estructural, esto se traduce en la incorporación de elementos estructurales adicionales o rutas alternativas de carga, de modo que si una parte de la estructura falla, las otras puedan asumir la carga sin colapsar. La redundancia es fundamental para asegurar que una falla parcial no conduzca al colapso total de la estructura, aumentando así la seguridad y la resiliencia del sistema (Caverzan & Solomos, 2014; P.G. Cimellaro et al., 2010a).
- **Ingenio:** El ingenio se refiere a la capacidad de adaptarse y encontrar soluciones creativas y efectivas frente a situaciones imprevistas. En el contexto de la resiliencia sísmica, implica la flexibilidad en el diseño y la planificación para incorporar nuevas tecnologías, materiales, y enfoques de mitigación a medida que se

desarrollan. También incluye la capacidad de implementar rápidamente soluciones ad hoc en el momento de un desastre para minimizar daños y acelerar la recuperación.

**Figura 10**

*La influencia del ingenio en la resiliencia.*



Fuente: Bruneau & Reinhorn, (2007)

Estas cuatro propiedades interrelacionadas permiten que una estructura o sistema no solo sobreviva a un evento sísmico, sino que también se recupere y continúe funcionando de manera efectiva, lo que es crucial para la seguridad y la sostenibilidad de las comunidades expuestas a riesgos sísmicos (Caverzan & Solomos, 2014; P. G. Cimellaro et al., 2010a).

#### **2.1.6.2. Funciones de Pérdida por Resiliencia.**

Las **Funciones de Pérdida por Resiliencia** son herramientas utilizadas en la ingeniería estructural y sísmica para evaluar el impacto de un evento sísmico en la funcionalidad y operatividad de una estructura o sistema. Estas funciones permiten estimar las pérdidas económicas, de tiempo, y de funcionalidad asociadas a los daños causados por un sismo, y cómo estos factores influyen en la resiliencia de la estructura.

### Principales Componentes de las Funciones de Pérdida por Resiliencia:

- 1) **Pérdida de Funcionalidad:** Esta función mide la disminución de la capacidad operativa de una estructura tras un evento sísmico. Puede expresarse en términos de porcentaje de funcionalidad restante en comparación con la funcionalidad original, y cómo esta se recupera con el tiempo (Caverzan & Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010a).
- 2) **Pérdida Económica Directa:** Evalúa los costos asociados a los daños estructurales y no estructurales. Incluye el costo de reparación o reemplazo de los componentes dañados de la estructura, y es fundamental para calcular el tiempo necesario para restaurar la funcionalidad (Caverzan & Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010a).
- 3) **Pérdida Económica Indirecta:** Considera los costos adicionales derivados de la pérdida de operatividad, como la interrupción de servicios, pérdida de ingresos, y otros efectos económicos que afectan a la comunidad o al propietario de la infraestructura (Caverzan & Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010a).
- 4) **Tiempo de Recuperación:** Esta función estima el tiempo necesario para que la estructura recupere su funcionalidad original o un nivel aceptable de operatividad. Es un componente clave en la evaluación de la resiliencia, ya que una recuperación rápida minimiza las pérdidas indirectas y económicas (Caverzan & Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010a).
- 5) **Curva de Resiliencia:** Integra las funciones de pérdida de funcionalidad y tiempo de recuperación para proporcionar una representación gráfica de cómo una estructura responde y se recupera tras un sismo. La curva de resiliencia permite evaluar la eficiencia de las medidas de mitigación y la efectividad del diseño estructural para soportar y recuperarse de desastres sísmicos (Caverzan & Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010a).

En resumen, las Funciones de Pérdida por Resiliencia son esenciales para comprender el impacto total de un evento sísmico y diseñar estrategias que mejoren la resiliencia de las infraestructuras críticas.

### **2.1.6.3. Función de Tiempo de Recuperación.**

La Función de Tiempo de Recuperación es una herramienta utilizada en la ingeniería estructural y sísmica para estimar el tiempo necesario para restaurar la funcionalidad de una estructura después de un evento sísmico. Esta función cuantifica el intervalo desde el momento en que ocurre el daño hasta que la estructura recupera un nivel operativo aceptable o completo. Es un componente crítico en la evaluación de la resiliencia, ya que un menor tiempo de recuperación indica una mayor capacidad de la estructura para volver a su estado funcional y minimizar el impacto negativo en las operaciones y la economía (Aroquipa et al., 2023b; Solomos & Caverzan, 2014).

Componentes de la Función de Tiempo de Recuperación:

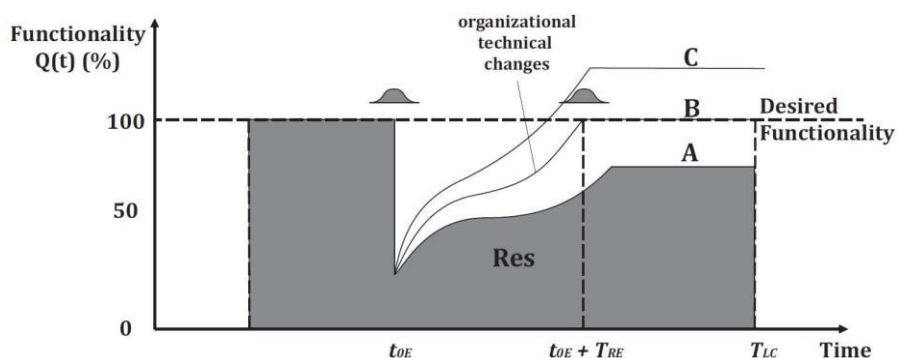
- 1) Evaluación Inicial del Daño: Determina el grado de daño causado por el evento sísmico, lo cual es esencial para planificar las reparaciones necesarias (Solomos & Caverzan, 2014).
- 2) Capacidad de Respuesta y Recursos Disponibles: Considera la disponibilidad de materiales, mano de obra y financiamiento para llevar a cabo las reparaciones. La eficiencia y rapidez con la que estos recursos se movilizan influye directamente en el tiempo de recuperación (Solomos & Caverzan, 2014).
- 3) Secuencia de Reparación: Establece el orden y la metodología de las reparaciones, desde las más críticas hasta las menores, optimizando el proceso para reducir el tiempo total de inactividad (Solomos & Caverzan, 2014).

- 4) Interferencias y Factores Externos: Incluye posibles demoras debido a factores como acceso limitado al sitio, condiciones climáticas adversas, o interrupciones en el suministro de materiales (Solomos & Caverzan, 2014).

La Función de Tiempo de Recuperación se utiliza para planificar y priorizar esfuerzos de rehabilitación, y es crucial en la elaboración de estrategias de resiliencia que minimicen el impacto de futuros desastres (Solomos & Caverzan, 2014).

**Figura 11**

*La influencia del ingenio en la resiliencia*



Fuente: Gian P. Cimellaro et al., (2010)

### 2.1.7. Curvas de Fragilidad Estructural y Resiliencia

#### 2.1.7.1. Curvas de Fragilidad Estructural

Las Curvas de Fragilidad Estructural son herramientas gráficas fundamentales en la evaluación del comportamiento sísmico de las estructuras. Estas curvas describen la probabilidad de que una estructura alcance o supere un cierto nivel de daño (conocido como estado límite) cuando es sometida a un evento sísmico de una intensidad específica. La fragilidad estructural se mide en función de parámetros como la aceleración máxima del suelo (PGA), la velocidad máxima del suelo (PGV), o el desplazamiento máximo experimentado por la estructura.

#### Desarrollo y Caracterización:

1. **Modelado Numérico y Datos Empíricos:** Las curvas de fragilidad pueden derivarse de dos fuentes principales: análisis numéricos y datos empíricos. En el caso de los análisis numéricos, se utilizan modelos computacionales que simulan la respuesta de la estructura ante diferentes escenarios sísmicos. En el enfoque empírico, se analizan datos históricos de daños observados en estructuras reales durante terremotos pasados.
2. **Estados de Daño:** Las curvas de fragilidad categorizan los daños estructurales en diferentes niveles: leve, moderado, extenso y completo. Cada curva muestra la probabilidad de que la estructura alcance cada uno de estos niveles de daño cuando se enfrenta a un sismo de cierta intensidad.
3. **Interacción con Parámetros de Intensidad:** A medida que la intensidad del sismo aumenta, la probabilidad de daño significativo (según lo definido por las curvas de fragilidad) también aumenta. Esto se representa gráficamente por una curva que generalmente tiene una forma sigmoidea (S), indicando que las probabilidades de daño aumentan rápidamente después de alcanzar un umbral de intensidad específico.

#### Aplicación en la Evaluación del Riesgo Sísmico:

- **Evaluación de la Vulnerabilidad:** Las curvas de fragilidad permiten a los ingenieros y planificadores evaluar qué tan vulnerable es una estructura a diferentes niveles de eventos sísmicos. Son esenciales para predecir el riesgo y planificar intervenciones estructurales que reduzcan esta vulnerabilidad.
- **Desplazamiento Post-Sísmico de las Curvas:** Después de un evento sísmico, es probable que la estructura se vuelva más frágil. Esto se refleja en un desplazamiento hacia la izquierda de la curva de fragilidad, indicando que la estructura ahora tiene una mayor

probabilidad de sufrir daños incluso con intensidades sísmicas menores en eventos futuros.

### **2.1.7.2. Curvas de Resiliencia**

Las Curvas de Resiliencia son representaciones gráficas que muestran la capacidad de una estructura para recuperar su funcionalidad tras un evento disruptivo, como un terremoto. Estas curvas ilustran cómo la funcionalidad de la estructura disminuye inmediatamente después del evento sísmico y cómo se recupera progresivamente con el tiempo.

Componentes de la Curva de Resiliencia:

- 1) **Funcionalidad Inicial y Reducción:** La curva de resiliencia típicamente comienza en un punto donde la funcionalidad es completa (100%), antes del evento sísmico. Después del evento, se produce una reducción en la funcionalidad, que se representa como una caída inmediata en la curva. La magnitud de esta caída está directamente relacionada con la severidad del daño estructural causado por el sismo.
- 2) **Recuperación en el Tiempo:** Tras la reducción inicial, la curva de resiliencia muestra cómo la funcionalidad de la estructura se recupera a lo largo del tiempo. La tasa de recuperación depende de varios factores, incluyendo la gravedad del daño, la disponibilidad de recursos para la reparación, y la eficacia de las intervenciones de reparación. Un mayor índice de resiliencia se asocia con una recuperación más rápida y completa.
- 3) **Nivel Final de Recuperación:** Este es el punto en el que la curva se estabiliza, indicando que la estructura ha alcanzado un nuevo nivel de funcionalidad. Este nivel final puede ser igual al nivel previo al sismo si la estructura se ha recuperado por completo, o puede ser inferior si la estructura no logra recuperar toda su funcionalidad.

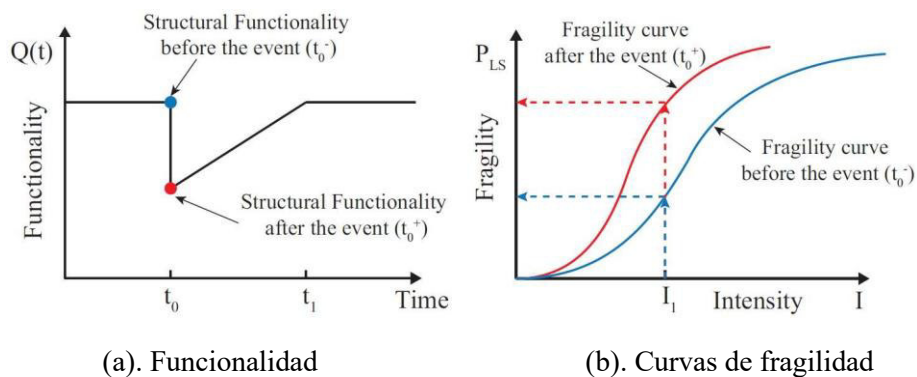
Aplicación de las Curvas de Resiliencia:

- **Planificación y Estrategia de Recuperación:** Las curvas de resiliencia son cruciales para planificar las estrategias de recuperación después de un sismo. Permiten identificar cuáles serán las áreas críticas que requerirán más atención para restaurar la operatividad de la estructura lo más rápido posible.
- **Evaluación de la Eficacia de las Intervenciones:** Al comparar la recuperación observada con la proyectada por las curvas de resiliencia, los ingenieros pueden evaluar la eficacia de las intervenciones de reparación implementadas y ajustar sus estrategias para futuros eventos.
- **Relación con la Fragilidad:** Una estructura que exhibe una gran fragilidad (es decir, tiene una alta probabilidad de daño significativo incluso a bajas intensidades sísmicas) probablemente tendrá una curva de resiliencia con una caída más pronunciada y una recuperación más prolongada. Por lo tanto, existe una relación inversa entre la fragilidad de una estructura y su resiliencia (Caverzan & Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010a).

### 2.1.7.3. Relación entre las Curvas de Fragilidad y Resiliencia

**Figura 12**

*Efectos de un evento con intensidad  $I_1$  sobre la curva de fragilidad.*



Fuente: (Solomos & Caverzan, 2014)

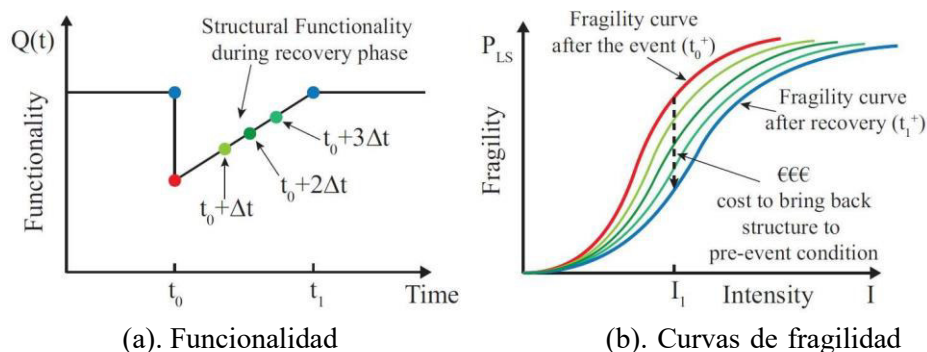
Las Curvas de Fragilidad y las Curvas de Resiliencia están profundamente interconectadas y juntas proporcionan una imagen completa del comportamiento sísmico de una estructura.

- **Fragilidad como Base para la Resiliencia:** Las curvas de fragilidad proporcionan la probabilidad de que una estructura experimente varios grados de daño bajo una determinada intensidad sísmica. Este grado de daño influye directamente en la forma en que la funcionalidad de la estructura se reduce después del evento, lo cual es representado por la curva de resiliencia (Caverzan & Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010a).
- **Impacto de la Fragilidad en la Resiliencia:** Una estructura con alta fragilidad (es decir, con curvas de fragilidad que indican una alta probabilidad de daño severo incluso a bajas intensidades sísmicas) tiende a mostrar una curva de resiliencia con una caída más brusca y una recuperación más lenta. Esto significa que mejorar la resiliencia de una estructura implica primero reducir su fragilidad mediante intervenciones de refuerzo y mejoras estructurales (Caverzan & Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010a).
- **Optimización de la Resiliencia:** Conociendo las curvas de fragilidad, se pueden diseñar intervenciones específicas para mejorar la resiliencia de la estructura. Esto puede incluir el refuerzo de elementos estructurales clave, la introducción de redundancia en el sistema estructural, o la implementación de tecnologías avanzadas de mitigación sísmica. A través de estas acciones, la curva de resiliencia puede modificarse para mostrar una menor caída en funcionalidad y una recuperación más rápida, lo que es crítico para mantener la operatividad de

infraestructuras críticas después de un sismo (Caverzan & Solomos, 2014; P. G. Cimellaro et al., 2010a).

**Figura 13**

*Ingenio y la fase de recuperación en la curva de fragilidad.*



Fuente: (Solomos & Caverzan, 2014)

Las Curvas de Fragilidad y las Curvas de Resiliencia no solo son herramientas complementarias sino también fundamentales en la evaluación y mejora del comportamiento sísmico de estructuras. Mientras que las curvas de fragilidad permiten anticipar el daño probable y la vulnerabilidad, las curvas de resiliencia se enfocan en la capacidad de recuperación, proporcionando un enfoque holístico para la gestión del riesgo sísmico y la planificación de intervenciones de mitigación (Caverzan & Solomos, 2014; Cimellaro et al., 2010a). El procedimiento para obtener los índices de resiliencia sísmica implica varios pasos clave, desde la definición del espectro de diseño hasta la determinación del índice de resiliencia final. Aquí se describe cada uno de estos pasos:

### **Paso 1: Definición del Espectro de Diseño**

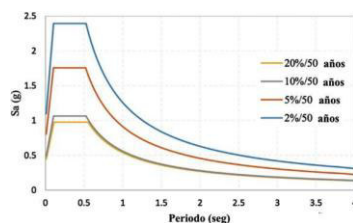
El primer paso consiste en definir el espectro de diseño sísmico, que representa la demanda sísmica esperada para la estructura. Este espectro se basa en las características sísmicas del sitio, como la aceleración máxima del suelo (PGA), la velocidad del suelo, y otros

parámetros específicos del lugar. El espectro de diseño sirve como base para evaluar cómo se comportará la estructura bajo diferentes niveles de intensidad sísmica.

**Paso 1.** Definir el espectro de diseño.

**Figura 14**

*Los espectros de diseño de Los Ángeles.*



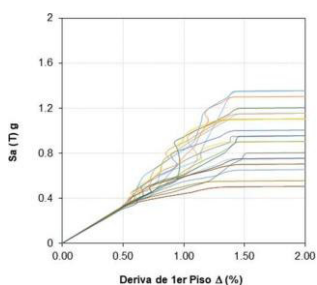
Fuente: (Yamín Lacouture, 2016)

**Paso 2: Desarrollo del Análisis Dinámico Incremental (IDA)**

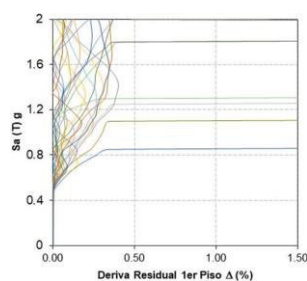
Una vez que se ha definido el espectro de diseño, se lleva a cabo un Análisis Dinámico Incremental (IDA). Este análisis implica aplicar una serie de registros sísmicos incrementales a un modelo estructural no lineal, escalando progresivamente la intensidad sísmica. El objetivo es evaluar la respuesta de la estructura en diferentes niveles de demanda, lo que permite obtener curvas de respuesta estructural en función de la intensidad del sismo.

**Figura 15**

*Curvas de Análisis dinámico Incremental IDA.*



(a) Curvas de derivas de piso



(b) Curvas de derivas de piso

Fuente: (Aroquipa, 2019)

**Tabla 9***Especificaciones de los sismos evaluados.*

N°	Sismo			Estación de registro		Datos del Lugar			Tipo de Aceración
	M	año	Nombre	Nombre	Características	NEHRP	$V_s = 30m/s$	$PGA_{Max}(g)$	
1	6.5	1979	Imperial Valley-06	EI Centro Array#6	CDMG	D	203	0.44	
2	6.5	1979	Imperial Valley-06	EI Centro Array#7	USGS	D	211	0.46	
3	6.5	1987	Superstition Hills-02	Parachute Test Site	USGS	D	349	0.42	
4	6.7	1992	Erzican, Turkey	Erzincan	--	D	275	0.49	
5	6.7	1994	Northridge-01	Rinaldi Receiving Sta	DWP	D	282	0.87	
6	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU065	CWB	D	306	0.82	
7	7.1	1999	Duzce, Turkey	Duzce	ERD	D	276	0.52	
8	6.5	1979	Imperial Valley-06	Bonds Corner	USGS	D	223	0.76	
9	6.5	1979	Imperial Valley-06	Chihuahua	UNAMUCSD	D	275	0.28	
10	6.7	1994	Northridge-01	Northridge - Saticoy	USC	D	281	0.42	
11	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Yarimca	KOERI	D	297	0.31	

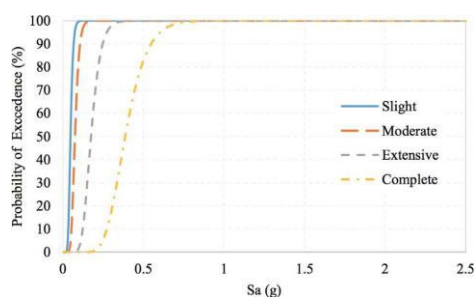
Fuente: (Rezaei Ranjbar &amp; Naderpour, 2020)

### Paso 3: Generación de Curvas de Fragilidad

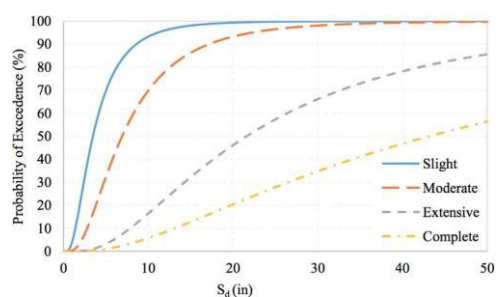
Con los resultados del IDA, se desarrollan las Curvas de Fragilidad Estructural. Estas curvas muestran la probabilidad de que la estructura alcance o supere ciertos niveles de daño bajo diferentes intensidades sísmicas. Las curvas de fragilidad son esenciales para entender cómo la estructura podría verse afectada por sismos de diversas magnitudes y sirven como base para los siguientes pasos en la evaluación de la resiliencia.

**Figura 16**

*Curvas de fragilidad para diferentes condiciones.*



Curvas de fragilidad para componentes estructurales en sismos de campo cercano.



Curvas de fragilidad para componentes estructurales en sismos de campo lejano.

Fuente: (Yamín Lacouture, 2016)

**Tabla 10**

*Valores de deriva de 4 niveles de daño de componentes estructurales.*

Propiedades del Edificio			Derivas entre pisos en los estados de umbral de daño			
Tipo	Altura (Pulgada)		Leve	Moderado	Extenso	Completo
	Cubierta	Modal				
CIH	1440	864	0.0031	0.0054	0.0146	0.0375

Fuente: (Rezaei Ranjbar & Naderpour, 2020)

**Tabla 11**

*Desviaciones promedio - niveles de daño - no estructural (derivadas).*

Tipo de Construcción	Media del desplazamiento espectral (pulgadas) y desviación estándar logarítmica (Beta)							
	Leve		Moderado		Extenso		Completo	
	Mediana	Beta	Mediana	Beta	Mediana	Beta	Mediana	Beta
C1H	3.46	0.71	6.91	0.71	21.6	0.79	43.2	0.93

**Fuente:** (Rezaei Ranjbar & Naderpour, 2020)

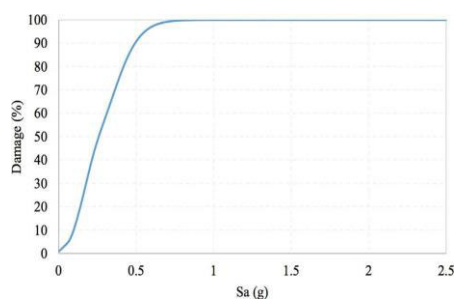
**Tabla 12.** Desviaciones promedio - niveles de daño - no estructural (aceleración).

Tipo de Construcción	Mediana de Aceleración espectral (g) y desviación estándar logarítmica (Beta)							
	Leve		Moderado		Extenso		Completo	
	Mediana	Beta	Mediana	Beta	Mediana	Beta	Mediana	Beta
C1H	0.38	0.65	0.75	0.65	1.5	0.65	3	0.65

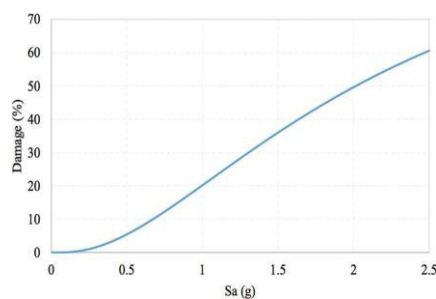
**Fuente:** (Rezaei Ranjbar & Naderpour, 2020)

**Figura 17**

*Curvas de vulnerabilidad para diferentes condiciones.*



Curvas de vulnerabilidad estructural obtenidas a partir de sismos



Curvas de vulnerabilidad para componentes no estructurales que son sensibles a la aceleración.

**Fuente:** (Rezaei Ranjbar & Naderpour, 2020)

#### **Paso 4: Desarrollo de Curvas de Vulnerabilidad**

A partir de las curvas de fragilidad, se generan las Curvas de Vulnerabilidad. Estas curvas expresan la probabilidad de que la estructura sufra daño total en función de la intensidad

del evento sísmico. Las curvas de vulnerabilidad combinan las probabilidades de los diferentes estados de daño para ofrecer una visión integral de la susceptibilidad de la estructura a daños severos.

### **Paso 5: Definición de la Función de Pérdida**

La Función de Pérdida se define utilizando las Curvas de Vulnerabilidad para calcular las pérdidas económicas asociadas con los diferentes niveles de daño estructural. Esta función cuantifica el costo económico de las reparaciones necesarias para restaurar la estructura después de un sismo. Las pérdidas pueden incluir tanto costos directos (como reparaciones estructurales) como indirectos (como interrupción de servicios).

**Tabla 13**

*Valores de pérdidas directas para sismos de epicentros cercano.*

Descripción	El nivel de peligro sísmico (en términos de porcentaje en 50 años)			
	2%	5%	10%	20%
Perdida (%)	6.875	5.592	2.257	2.006

Fuente: (Rezaei Ranjbar & Naderpour, 2020)

**Tabla 14**

*Valores de pérdidas directas para sismos de epicentros lejano.*

Descripción	El nivel de peligro sísmico (en términos de porcentaje en 50 años)			
	2%	5%	10%	20%
Perdida (%)	4.338	2.388	0.789	0.725

Fuente: (Rezaei Ranjbar & Naderpour, 2020)

### **Paso 6: Definición de las Curvas de Funcionalidad**

Las Curvas de Funcionalidad describen cómo la estructura recupera su capacidad operativa después de un sismo. Estas curvas se desarrollan en función de la magnitud del daño y el tiempo de recuperación necesario para restaurar la funcionalidad. Las curvas de

funcionalidad permiten estimar el impacto a largo plazo del sismo sobre la operación de la estructura y son fundamentales para calcular la resiliencia.

**Tabla 15**

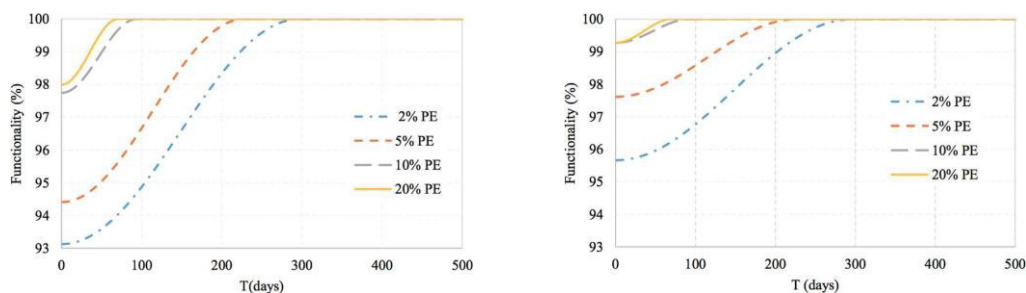
*Valores del tiempo de recuperación según diferentes niveles de peligro.*

El nivel de peligro sísmico (en términos de porcentaje en 50 años)				
Descripción	2%	5%	10%	20%
Tiempo de recuperación (día)	297	228	94	71

Fuente: (Rezaei Ranjbar & Naderpour, 2020)

**Figura 18**

*Curvas de funcionalidad para cuatro niveles de peligro sísmico.*



Fuente: (Rezaei Ranjbar & Naderpour, 2020)

### **Paso 7: Determinación del Índice de Resiliencia Sísmica**

Finalmente, el Índice de Resiliencia Sísmica se determina combinando los resultados de las curvas de funcionalidad y la función de pérdida. Este índice mide la capacidad de la estructura para absorber el impacto de un sismo y recuperarse de manera eficiente. Un índice de resiliencia alto indica que la estructura no solo tiene una alta resistencia al daño, sino también una rápida capacidad de recuperación, minimizando las pérdidas económicas y el tiempo de inactividad.

**Tabla 16**

*Valores de resiliencia para diferentes niveles de peligro – cercanos.*

Probabilidad excedida en 50 años (%)	Tiempo de recuperación (días)	Funcionalidad residual (%)	Resiliencia (%)
2	297	93.1252	96.56
5	228	94.4085	97.2
10	94	97.7432	98.7
20	71	97.9946	99

**Fuente:** (Rezaei Ranjbar & Naderpour, 2020)

**Tabla 17**

*Valores de resiliencia para diferentes niveles de peligro – Lejano.*

Probabilidad excedida en 50 años (%)	Tiempo de recuperación (días)	Funcionalidad residual (%)	Resiliencia (%)
2	297	95.6623	97.83
5	228	97.6123	98.81
10	94	99.2756	99.61
20	71	99.2757	99.64

**Fuente:** (Rezaei Ranjbar & Naderpour, 2020)

## 2.2. Base filosófica

### 2.2.1. Amenaza Sísmica Probabilista para Resiliencia de viviendas autoconstruidos.

La amenaza sísmica probabilista representa un enfoque integral en la evaluación de riesgos sísmicos que subraya la importancia de un análisis detallado de la acción sísmica para la resiliencia de estructuras, particularmente en viviendas autoconstruidas. Según Pinto & Franchin (2007) este enfoque no solo recalca la necesidad de un diseño estructural robusto, sino que también exige un cambio paradigmático hacia la ingeniería sismorresistente, en la cual se realza la importancia de adaptar modelos con un alto grado de realismo. Este cambio es fundamental, dado que la construcción autoconstruida a menudo carece de las medidas de

ingeniería convencionales y, por lo tanto, es más susceptible a sufrir daños significativos sin las adecuadas consideraciones de diseño sismorresistente.

En la metodología de la amenaza sísmica probabilista, como la descrita por Yamin, (2015) y apoyada en los fundamentos de Bozorgnia & Bertero (2004); Finn (2000); Kramer, (1996), la estimación de riesgos se centra en la probabilidad de exceder ciertos parámetros de intensidad sísmica en un sitio específico y tiempo determinado. Este enfoque utiliza un modelo de cuatro etapas que comienza con la identificación y caracterización de las fuentes sísmicas, pasando por el desarrollo de distribuciones de ocurrencias de eventos sísmicos, la estimación de parámetros de intensidad sísmica a través de modelos predictivos y finaliza con la integración de incertidumbres para determinar la probabilidad de excedencia. Este método no solo proporciona un cálculo más preciso del riesgo, sino que también permite una mejor planificación y respuesta en áreas propensas a la actividad sísmica, lo cual es crucial para viviendas que no han sido construidas bajo un riguroso control de ingeniería.

La aplicación de este marco en el contexto de la resiliencia de viviendas autoconstruidas es vital para mejorar su capacidad de resistir y recuperarse de eventos sísmicos. Herramientas como Hazus de FEMA (FEMA, 2009) o el CRISIS 2007 (Ordaz et al., 2007; Ordaz et al., 2019) permiten modelar y visualizar riesgos sísmicos en diferentes niveles, proporcionando una base sólida para la implementación de medidas preventivas y correctivas. Asimismo, estos modelos fomentan una comprensión más profunda de las interacciones dinámicas entre el suelo, la cimentación y la estructura, elementos cruciales para diseñar estrategias de mitigación efectivas en contextos de autoconstrucción. En conjunto, la amenaza sísmica probabilista no solo mejora la seguridad estructural, sino que también promueve una cultura de resiliencia y preparación ante desastres en comunidades vulnerables.

### ***2.2.2. Vulnerabilidad Sísmica: Estado del arte retrospectiva y prospectiva***

La vulnerabilidad sísmica de las viviendas autoconstruidas abarca un análisis profundo y complejo, dada la frecuencia e impacto devastador de los terremotos en las últimas dos décadas. Según Glaister & Pinho (2003) la magnitud de las pérdidas humanas y económicas ha aumentado exponencialmente, como lo demuestra el catastrófico terremoto de Haití en 2010 que cobró entre 46.000 y 316.000 vidas. A esto se suma el terremoto de Tohoku en Japón en 2011, que además de causar 20.475 muertes, dejó a más de un millón de personas sin hogar y generó pérdidas económicas valoradas en 140 mil millones de dólares (Daniell & Vervaeck, 2011). Estos eventos subrayan la crítica necesidad de adoptar enfoques robustos para evaluar la vulnerabilidad sísmica, especialmente en contextos donde las edificaciones no siempre cumplen con los estándares de construcción óptimos (Glaister & Pinho, 2003).

Los enfoques actuales para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica se centran en una combinación de parámetros que incluyen el diseño estructural, la capacidad sísmica, las condiciones específicas del sismo y la recopilación de datos de campo. Estos factores contribuyen a proporcionar una estimación realista del comportamiento potencial de las estructuras frente a un sismo. La evaluación se complica por la necesidad de considerar la irregularidad del diseño y la degradación material a lo largo del tiempo, lo que puede alterar significativamente la respuesta de una estructura durante un terremoto. Además, la disparidad en la estructura y seguridad del edificio se reconoce a menudo solo después de eventos significativos, lo que lleva a revisiones en las prácticas de construcción y normativas de seguridad post-sismo (Masi & Vona, 2012).

De cara al futuro, es crucial la integración de métodos empíricos y analíticos en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Los métodos empíricos, que utilizan escalas de daños y análisis estadísticos post-evento, proporcionan datos valiosos sobre los impactos reales de los sismos en las estructuras. Paralelamente, los enfoques analíticos, que se basan en las propiedades mecánicas y los atributos estructurales, ofrecen predicciones sobre cómo las

edificaciones podrían comportarse bajo condiciones sísmicas específicas. Esta combinación de metodologías no solo mejora la precisión de las evaluaciones de vulnerabilidad, sino que también fortalece las estrategias de mitigación y preparación ante futuros terremotos, lo que es especialmente relevante para mejorar la resiliencia de las viviendas autoconstruidas que forman una parte significativa del tejido urbano en muchas regiones del mundo.

### ***2.2.3. Resiliencia Sísmica en Sistemas Estructurales***

La resiliencia, que se origina del término latino *resilio* que significa "saltar hacia atrás", es un concepto que se ha aplicado en numerosos campos, aunque su uso original sigue siendo objeto de debate. Según Batabyal (1998) algunos argumentan que el concepto proviene de la ecología, mientras que otros, como Van der Leeuw & Aschan-Leygonie (2005) sugieren sus raíces en la física. Sin embargo, la mayoría de los estudios señala que el entendimiento de la resiliencia comenzó a tomar forma dentro de las disciplinas de la psicología - psiquiatría hace unas década de 1940 (Johnson & Wiechelt, 2004; Waller, 2001). En la actualidad, la resiliencia es un término crucial especialmente en la gestión de desastres, reflejando la diversidad y complejidad del pensamiento contemporáneo sobre los desastres y la construcción de sistemas resilientes.

El desarrollo del concepto de resiliencia se ha definido de dos maneras principales en la literatura: como un resultado deseado y como un proceso que conduce a ese resultado (Kaplan, 2002). Un examen de las diversas definiciones propuestas por diferentes autores (detalladas en la Tabla 30) revela un refinamiento gradual en la comprensión de la resiliencia: evolucionando de una perspectiva orientada a resultados a una más centrada en procesos. Inicialmente, la resiliencia se consideraba un proceso para alcanzar un estado deseado, utilizando términos como "afrontar", "recuperarse" y "absorber impactos negativos" para describir la capacidad de volver a un estado de normalidad lo más rápidamente posible. Esto

se asemeja al comportamiento de objetos físicos que regresan a su forma original tras ser deformados (Manyena, 2006).

En cuanto a la resiliencia humana, se enfoca más en la rápida recuperación de shocks, enfermedades o dificultades (Vickers & Kouzmin, 2001). Desde la perspectiva de la gestión de desastres y la mitigación del riesgo, el objetivo de la resiliencia es minimizar la pérdida de vidas y medios de subsistencia y facilitar que el sistema o ambiente afectado se recupere lo más rápidamente posible. Es crucial reconocer que la resiliencia en este contexto se vincula profundamente con la capacidad humana de superar adversidades, lo que va más allá de la mera capacidad de resistencia y abarca una recuperación integral y sostenible.

#### ***2.2.4. Un marco Filosófico Conceptual para Resiliencia***

La resiliencia sísmica de portafolios ha capturado la atención de la academia, y todo aquel que dedique al entendimiento de la ingeniería sísmica y resiliencia, debido a las graves consecuencias que pueden desencadenar los sismos. En Estados Unidos, la Ley de Mitigación de Desastres de 2000 y las subsiguientes regulaciones, como la ordenanza SB1953 después del sismo de Northridge en 1994, han establecido bases legales sólidas para la mitigación y preparación ante desastres, subrayando la importancia de que las instalaciones críticas, como las de cuidados intensivos, estén equipadas para funcionar plenamente tras un sismo. Estas legislaciones no solo promueven la resistencia estructural, sino que también enfatizan la necesidad de un enfoque integral que abarque diversas dimensiones de la resiliencia.

##### ***a) Dimensiones de la resiliencia***

Bruneau et al. (2003) proponen que la resiliencia en la mitigación sísmica puede conceptualizarse a través de 04 características relacionadas: técnica, organizacional, social y económica, conocidas por el acrónimo TOSE. La dimensión técnica se enfoca en la capacidad de los sistemas físicos para resistir fuerzas sísmicas sin degradación significativa, mientras que

la dimensión organizacional se ocupa de la capacidad de las agencias y organizaciones para responder eficazmente a emergencias. Por otro lado, la resiliencia social busca minimizar las consecuencias adversas en la comunidad derivadas de la pérdida de servicios críticos, y la resiliencia económica se centra en la reducción de pérdidas económicas directas e indirectas. Juntas, estas dimensiones facilitan un enfoque holístico para mejorar la resistencia comunitaria ante sismos (Bruneau et al. 2003).

***b) Propiedades de la resiliencia.***

Además Bruneau et al. (2003) destacan cuatro propiedades clave de la resiliencia: robustez, rapidez, redundancia e ingenio, denominadas las "4Rs". La robustez describe la capacidad de los sistemas a sufrir fallos bajo estrés sísmico, mientras que la rapidez se refiere a la capacidad de recuperarse ágilmente de los daños para mitigar pérdidas adicionales. La redundancia implica la disponibilidad de alternativas funcionales en caso de fallo de algún elemento o sistema, y el ingenio representa la habilidad para movilizar y aplicar recursos en situaciones críticas. Este marco no solo profundiza en la comprensión de la resiliencia sísmica, sino que también orienta el desarrollo de estrategias y políticas que fortalecen la infraestructura esencial y la preparación comunitaria frente a desastres naturales. En conjunto, estas dimensiones y propiedades forman un marco filosófico robusto para abordar la resiliencia en sistemas estructurales y comunidades, destacando la necesidad de una preparación multifacética que sea tanto preventiva como adaptativa (Bruneau et al., 2003).

Cuando se trata de la resiliencia sísmica de las comunidades, es crucial comenzar centrándose en las organizaciones e instalaciones esenciales cuyo funcionamiento es vital para la recuperación comunitaria después de los desastres sísmicos. Las infraestructuras críticas, que incluyen el suministro de energía, sistemas de agua, hospitales de cuidados intensivos y servicios encargados de la gestión de emergencias, constituyen la columna vertebral de la comunidad y son fundamentales para mantener su bienestar en tiempos de crisis. Bruneau et

al. (2003) sugieren un conjunto de medidas ilustrativas de resiliencia, las cuales abarcan las cuatro dimensiones y propiedades de resiliencia antes mencionadas. Estas medidas están detalladas en la Tabla 16 y, aunque inicialmente sirven para ilustrar las definiciones básicas, a través de investigaciones adicionales, estas deben ser afinadas para alinearse mejor con una comprensión más profunda de la resiliencia comunitaria y de sistemas. Desarrollar indicadores de resiliencia que sean cuantificables, precisos y significativos sigue siendo un desafío principal, dado que la resiliencia es un concepto intrínsecamente multidimensional. En los capítulos subsiguientes de esta investigación, se explorará cómo estas medidas pueden ser optimizadas para mejorar la preparación y respuesta a terremotos en contextos comunitarios.

## **2.3. Base conceptual extendida**

### **2.3.1. *Métodos de Análisis y Aspectos Conceptuales.***

#### **2.3.1.1. Análisis Estático Lineal.**

Moreno & Barbat (2007) el Análisis Estático Lineal es un método fundamental en la ingeniería estructural utilizado para evaluar cómo una estructura responde bajo la acción de cargas estáticas aplicadas, como el peso propio o cargas permanentes. Este análisis asume que los materiales de la estructura se comportan de manera lineal y elástica, lo que significa que las deformaciones son proporcionales a las cargas aplicadas, siguiendo la ley de Hooke. El proceso comienza con la creación de un modelo estructural, generalmente mediante elementos finitos, donde se aplican las cargas estáticas. A partir de aquí, se resuelven las ecuaciones de equilibrio para determinar las fuerzas internas (como momentos, fuerzas cortantes y axiales) y las deformaciones que ocurren en la estructura. Este tipo de análisis es esencial para verificar que las tensiones y deformaciones se mantengan dentro de los límites de seguridad especificados, garantizando que la estructura sea segura y funcional bajo condiciones de carga previstas. Sin embargo, debido a su simplicidad, no es adecuado para analizar comportamientos no lineales o efectos dinámicos, lo que limita su uso en situaciones más complejas, como eventos sísmicos.

#### **2.3.1.2. Análisis Dinámico Lineal.**

Moreno & Barbat (2007) el Análisis Dinámico Lineal es una técnica utilizada en ingeniería estructural para evaluar la respuesta de una estructura cuando es sometida a cargas dinámicas, como movimientos sísmicos, cargas de viento, o vibraciones de maquinaria. A diferencia del análisis estático, este método considera las propiedades inerciales y de amortiguamiento de la estructura, así como la variabilidad de las cargas en el tiempo. El proceso implica la resolución de ecuaciones de movimiento que describen cómo las fuerzas dinámicas afectan el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de la estructura. Este análisis

asume que el comportamiento de los materiales sigue siendo lineal-elástico, es decir, la relación entre la fuerza aplicada y la deformación es proporcional y sigue la ley de Hooke. Es especialmente útil para diseñar estructuras que deben resistir cargas dinámicas, asegurando que las tensiones y deformaciones se mantengan dentro de los límites de seguridad durante eventos como terremotos o ráfagas de viento, aunque no captura el comportamiento no lineal que podría ocurrir en situaciones extremas (Moreno et al., 2007).

#### **2.3.1.3. Análisis Estático No Lineal.**

Según Moreno & Barbat (2007) el Análisis Estático No Lineal, también conocido como Pushover Analysis, es una técnica avanzada en ingeniería estructural utilizada para evaluar la capacidad de una estructura ante cargas que incrementan gradualmente, simulando un comportamiento realista bajo condiciones extremas como terremotos. A diferencia del análisis estático lineal, este método tiene en cuenta la plasticidad del material y los grandes desplazamientos, lo que permite capturar el comportamiento no lineal de la estructura, incluyendo la degradación de rigidez y resistencia. El proceso implica aplicar cargas incrementales a la estructura hasta que se alcance un estado límite, como el colapso o una deformación inaceptable. Este tipo de análisis es fundamental para identificar los puntos débiles de una estructura y evaluar su capacidad para soportar eventos sísmicos severos, proporcionando información clave para reforzamientos o mejoras de diseño (Garrido, 2015).

#### **2.3.1.4. Análisis Dinámico No Lineal.**

Según Moreno & Barbat (2007) el Análisis Dinámico No Lineal es un método avanzado en ingeniería estructural que permite evaluar la respuesta de una estructura bajo cargas dinámicas, como sismos, considerando el comportamiento no lineal de los materiales y grandes deformaciones. A diferencia de los análisis lineales, este enfoque tiene en cuenta la plasticidad del material, los efectos de degradación y los posibles mecanismos de colapso, proporcionando

una representación más realista del comportamiento estructural durante un evento extremo. Se resuelven las ecuaciones de movimiento en el tiempo, lo que permite capturar la evolución de las fuerzas internas, desplazamientos, velocidades y aceleraciones a lo largo del evento dinámico. Este tipo de análisis es esencial para diseñar estructuras que puedan resistir de manera segura eventos sísmicos severos y es clave en la ingeniería de estructuras resilientes (Moreno et al., 2007).

#### **2.3.1.5. Curvas y Espectro de Capacidad.**

Las Curvas de Capacidad y el Espectro de Capacidad son herramientas fundamentales en la ingeniería sísmica para evaluar la respuesta estructural bajo cargas crecientes. Estas curvas se obtienen a partir de un análisis estático no lineal o *Pushover Analysis*.

##### **Curvas de Capacidad:**

- **Definición:** Una curva de capacidad describe la relación entre el corte basal (fuerza aplicada) y el desplazamiento en la estructura. Representa cómo una estructura soporta cargas crecientes, mostrando el punto en que la estructura entra en el rango no lineal y finalmente alcanza su capacidad máxima antes de colapsar (Kircher et al., 1997).
- **Interpretación:** La curva ilustra la rigidez de la estructura en diferentes etapas de carga. Al principio, la curva es lineal, pero al aumentar la carga, la estructura comienza a ceder y la curva se aplana, indicando la pérdida de rigidez (Kircher et al., 1997).

##### **Espectro de Capacidad:**

- **Definición:** El espectro de capacidad es una representación gráfica que combina la curva de capacidad con la demanda sísmica de un espectro de diseño. Transforma

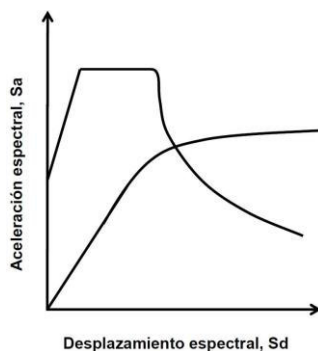
la curva de capacidad en el dominio de la aceleración y el desplazamiento para compararla directamente con la demanda sísmica (Kircher et al., 1997).

- **Aplicación:** Este espectro permite evaluar la capacidad de la estructura para resistir diferentes niveles de demanda sísmica, identificando la seguridad sísmica y el nivel de daño esperado bajo un terremoto específico (Kircher et al., 1997).

En conjunto, las Curvas y el Espectro de Capacidad proporcionan una visión detallada de la capacidad de una estructura para soportar cargas sísmicas, ayudando a los ingenieros a diseñar y reforzar estructuras para mejorar su resiliencia ante terremotos.

**Figura 19**

*Espectro de capacidad y demanda.*



Fuente: (Barbat et al., 2015)

#### **2.3.1.6. Espectro de Capacidad Bilineal.**

El Espectro de Capacidad Bilineal es una simplificación de la curva de capacidad de una estructura, utilizada en análisis sísmicos para representar el comportamiento no lineal de una estructura de manera más manejable. Esta simplificación se realiza al aproximar la curva completa (que normalmente tiene una forma más compleja) a dos tramos rectos: uno lineal, que representa el comportamiento elástico de la estructura, y otro con pendiente reducida, que simula el comportamiento plástico o post-elástico.

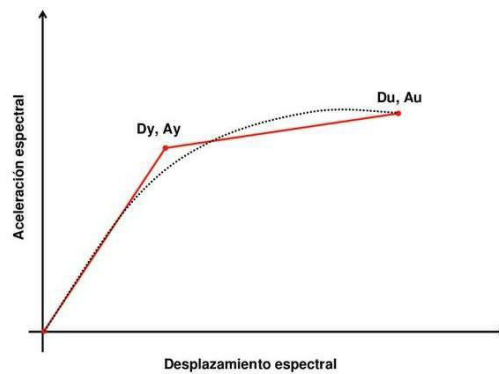
Componentes del Espectro de Capacidad Bilineal:

- **Tramo Elástico:** La primera parte de la curva es una línea recta que representa la respuesta elástica de la estructura, donde la relación entre la fuerza y el desplazamiento es lineal y proporcional. Esto corresponde a la fase en que la estructura se comporta dentro de su capacidad de elasticidad, sin sufrir daños permanentes.
- **Punto de Fluencia:** El punto donde la curva cambia de pendiente, conocido como punto de fluencia, indica el inicio de la respuesta no lineal de la estructura. Aquí, la estructura comienza a experimentar deformaciones plásticas, y la capacidad de resistencia adicional se reduce.
- **Tramo Post-Elástico:** El segundo tramo de la curva tiene una pendiente más suave que el tramo elástico. Este tramo representa la capacidad residual de la estructura después de que ha comenzado a experimentar daños plásticos. El análisis en esta etapa es crucial para determinar hasta qué punto la estructura puede soportar cargas adicionales antes de alcanzar su capacidad última y colapsar.

El Espectro de Capacidad Bilineal se utiliza para simplificar el análisis sísmico no lineal, facilitando la evaluación de la capacidad sísmica de la estructura y su comparación con las demandas sísmicas. Es una herramienta clave en el diseño de estructuras resistentes a terremotos, ayudando a los ingenieros a entender hasta qué punto una estructura puede deformarse y resistir antes de fallar, y proporcionando un enfoque simplificado para realizar análisis de desempeño estructural en

**Figura 20**

*Representación bilineal de la curva de capacidad.*



Fuente: (Moreno González, 2006b).

### 2.3.2. Respuesta Dinámica de Sistemas Estructurales

#### 2.3.2.1. Sistemas de un Grado de Libertad.

Un Sistema de un Grado de Libertad (SDOF, por sus siglas en inglés) es un modelo simplificado en dinámica estructural que representa la respuesta de una estructura a las fuerzas aplicadas, considerando un único movimiento posible. Este movimiento puede ser un desplazamiento, una rotación, o cualquier otra deformación, pero está restringido a una sola dirección o forma. El sistema SDOF se describe mediante una masa (representando la inercia del sistema), una rigidez (que define la resistencia del sistema a la deformación), y un amortiguamiento (que representa las fuerzas disipativas, como la fricción o el amortiguamiento interno).

Componentes del SDOF:

- Masa ( $m$ ): Representa la inercia del sistema, es decir, la resistencia de la estructura a cambiar su estado de movimiento.
- Rigidez ( $k$ ): Define la capacidad del sistema para resistir deformaciones bajo una carga aplicada. Está relacionada con la constante de resorte en el modelo físico.

- Amortiguamiento (c): Describe las fuerzas que disipan energía, tales como fricción o resistencia interna, y que limitan la amplitud de oscilaciones.

El SDOF es ampliamente utilizado en la evaluación de la respuesta sísmica de estructuras simples, permitiendo predecir desplazamientos, fuerzas internas y vibraciones inducidas por sismos. Aunque simplificado, es una herramienta poderosa para entender la dinámica de estructuras más complejas, proporcionando una base para el análisis de sistemas de múltiples grados de libertad (MDOF).

#### **2.3.2.2. Espectros de Respuesta.**

Los Espectros de Respuesta son herramientas gráficas clave en la ingeniería sísmica que permiten analizar la máxima respuesta de un sistema estructural de un grado de libertad (SDOF) sometido a una excitación dinámica, como un terremoto. Estos espectros muestran cómo la respuesta máxima de un sistema (en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración) varía en función de su período de vibración o frecuencia natural. Al representar la respuesta máxima de sistemas con diferentes rigideces y masas bajo la misma carga dinámica, los espectros de respuesta permiten a los ingenieros diseñar estructuras más seguras y resistentes a sismos. Al comprender cómo varían las respuestas según las propiedades dinámicas del sistema, los espectros proporcionan información crítica para el diseño sísmico, asegurando que las estructuras sean capaces de soportar movimientos sísmicos sin fallar, optimizando su rendimiento bajo las condiciones más extremas. Estos espectros son fundamentales en la evaluación del comportamiento sísmico de las estructuras, permitiendo prever y mitigar los efectos de los terremotos, garantizando así la integridad estructural y la seguridad de las edificaciones.

#### **2.3.3. Riesgo Sísmico**

El riesgo sísmico es la probabilidad de que se produzcan pérdidas humanas, daños materiales, o interrupciones socioeconómicas como resultado de un terremoto. Este concepto integra tres componentes fundamentales: la peligrosidad sísmica, que se refiere a la probabilidad de ocurrencia de un sismo en una región determinada; la exposición, que incluye los bienes y personas susceptibles de ser afectados por el sismo; y la vulnerabilidad, que evalúa la capacidad de las estructuras y sistemas para resistir y recuperarse de los efectos de un terremoto (Villar-Vega et al., 2017). El riesgo sísmico, por tanto, no solo considera la magnitud de un evento sísmico, sino también cómo este afectará a una comunidad específica, teniendo en cuenta sus infraestructuras y capacidades de respuesta (Barbat & Pujades, 1998; Salgado-Gálvez et al., 2015).

#### **2.3.3.1. Exposición Sísmica.**

La exposición sísmica se refiere a la totalidad de los elementos dentro de una región que podrían verse afectados por un terremoto. Esto incluye personas, edificios, infraestructuras, servicios esenciales y actividades económicas. La exposición no solo abarca el número de elementos presentes, sino también su distribución geográfica y su importancia relativa para la comunidad. En resumen, representa el conjunto de activos que están en riesgo debido a la ocurrencia de un sismo (Yamin et al., 2017).

#### **2.3.3.2. Amenaza Sísmica.**

La amenaza sísmica es la probabilidad de que se produzca un terremoto en un área específica, con una intensidad capaz de causar daños (Acevedo et al., 2017; Aroquipa et al., 2017). Esta amenaza se caracteriza por la frecuencia, magnitud y ubicación de posibles sismos, basándose en estudios históricos, geológicos y geofísicos. La amenaza sísmica incluye la estimación de parámetros como la aceleración del suelo y la intensidad sísmica que podrían

experimentarse en la región debido a futuros terremotos (Aroquipa et al., 2024). Es un componente esencial para evaluar el riesgo sísmico y planificar estrategias de mitigación.

### **2.3.3.3. Vulnerabilidad Sísmica.**

La vulnerabilidad sísmica mide la susceptibilidad de los elementos expuestos (como edificios, infraestructuras y poblaciones) a sufrir daños cuando ocurre un terremoto. Esta vulnerabilidad depende de diversos factores, como la calidad del diseño y la construcción, la antigüedad de las estructuras, los materiales utilizados, la capacidad de resistencia, y la preparación de la comunidad para enfrentar desastres (Bommer & Boore, 2004; Selley et al., 2004). Cuanto mayor sea la vulnerabilidad, más probabilidad hay de que un terremoto cause daños significativos. La evaluación de la vulnerabilidad es crucial para identificar las debilidades estructurales y no estructurales y para implementar medidas de refuerzo o mitigación (Barbat et al., 2016; Pujades & Barbat, 2011).

### **2.3.4. Evaluación del daño sísmico**

#### **2.3.4.1. Daño Sísmico.**

El daño sísmico de sistemas estructurales se refiere al deterioro o degradación que sufre una estructura como consecuencia de la acción de un terremoto. Este daño puede manifestarse de diversas formas, como grietas en muros, deformaciones permanentes, fallas en conexiones, colapso parcial o total, entre otros. El grado de daño depende de varios factores, incluyendo la intensidad del sismo, la vulnerabilidad del sistema estructural, y la calidad del diseño y construcción. Evaluar el daño sísmico es crucial para determinar la seguridad y funcionalidad de una estructura después de un evento sísmico, todo ello estudiado por Banon & Biggs, (1981); Bracci et al. (1989); Chung & Shinozuka, (1988); DiPasquale & Cakmak, (1988); Hasselman, Eguchi, & Wiggins, (1980); Kunnath & Lobo, (1992); Kunnath et al., (1992); Roufaiel & Meyer, (1987).

### 2.3.4.2. Índice de Daños.

El Índice de Daño es una medida cuantitativa que se utiliza para evaluar el nivel de daño sufrido por una estructura debido a un sismo. Este índice se expresa generalmente en una escala de 0 a 1, donde 0 indica que no hay daño y 1 representa un daño total o colapso. El Índice de Daño se calcula en función de las deformaciones, las fuerzas internas y otros parámetros estructurales obtenidos durante y después de un evento sísmico. Este índice es fundamental para evaluar la necesidad de reparaciones, refuerzos o incluso la demolición de una estructura, así como para estimar las pérdidas económicas y los tiempos de recuperación asociados.

**Tabla 18**

*Rangos del índice de daño de Park y Ang.*

<b>Estado de daño</b>	<b>Rango para el índice</b>
Menor	0.1 - 0.2
Moderado	0.2 - 0.5
Severo	0.5 - 1.0
Colapso	> 1.0

Fuente: (Y. J. Park et al., 1987; Yamin, 2015)

**Tabla 19**

*Rangos del índice de Bracci para los diferentes estados de daño.*

<b>Estado de daño</b>	<b>Rango de variación del índice de daño</b>
No daño < 0.33	< 0.33
Reparable	0.33 - 0.66
Irreparable	0.66 - 1.0
Colapso	> 1.0

Fuente: (Bracci et al., 1989)

**Tabla 20**

*Límites del índice de Calvi para los estados de daño - mampostería.*

<b>Estado de daño</b>	<b>Intervalos de derivas, <math>\delta(\%)</math></b>
Leve (LS1)	< 0.1
Moderado (LS2)	0.1 - 0.3
Severo (LS3)	0.3 - 0.5
Colapso (LS4)	> 0.5

Fuente: (Calvi, 1999)

### **2.3.5. Evaluación del Desempeño Sísmico**

La Evaluación del Desempeño Sísmico es un proceso clave en la ingeniería estructural que se centra en determinar cómo una estructura responderá ante un terremoto. Esta evaluación incluye analizar si la estructura cumplirá con los objetivos de desempeño establecidos, como la prevención de colapso, la limitación de daños y la protección de la vida humana. Se utilizan diferentes métodos analíticos y herramientas, como análisis estáticos y dinámicos (lineales y no lineales), para predecir el comportamiento de la estructura bajo cargas sísmicas (Chopra & Goel, 2002; Fajfar, 1999; Freeman, 1978; Reyes & Chopra, 2012). Los resultados de esta evaluación permiten tomar decisiones informadas sobre el diseño, refuerzo y reparación de estructuras para mejorar su capacidad de resistir sismos, garantizando así la seguridad y funcionalidad de los edificios durante y después de un evento sísmico.

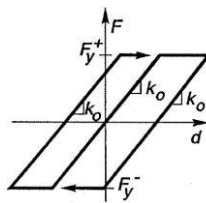
#### **2.3.5.1. El Análisis Estático no Lineal y la Curva de Capacidad.**

El Análisis Estático no Lineal, conocido como Pushover Analysis, es una técnica utilizada para evaluar la capacidad de una estructura bajo cargas sísmicas crecientes. Este análisis se realiza aplicando fuerzas laterales incrementales a un modelo estructural hasta que se alcanza un estado límite, como el colapso o una deformación inaceptable. El resultado de este análisis se representa en la Curva de Capacidad, que muestra la relación entre la fuerza aplicada (corte basal) y el desplazamiento de la estructura. La curva proporciona información

crucial sobre el comportamiento no lineal de la estructura, identificando puntos clave como el inicio de la plasticidad y el colapso. A través de esta curva, los ingenieros pueden evaluar la rigidez, resistencia y ductilidad de la estructura, y determinar si cumple con los objetivos de desempeño sísmico establecidos. Esta herramienta es esencial para diseñar y reforzar estructuras, mejorando su capacidad de resistir terremotos severos (Vargas, 2013).

**Figura 21**

*Modelo constitutivo elasto-plástico.*



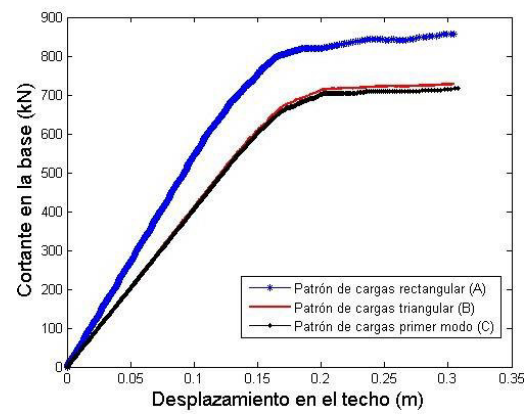
Fuente: (Vargas Alzate, 2013)

#### 2.3.5.2. Espectro de Capacidad.

El Espectro de Capacidad es una herramienta analítica que transforma la curva de capacidad de una estructura, obtenida mediante un análisis estático no lineal (Pushover Analysis), en un formato que facilita la comparación directa con las demandas sísmicas del espectro de diseño. Este espectro convierte la relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento (curva de capacidad) en una relación entre aceleración y desplazamiento, que se puede comparar con las demandas sísmicas esperadas para la ubicación específica de la estructura. Este enfoque permite evaluar de manera más precisa si una estructura puede satisfacer las demandas sísmicas previstas, al considerar tanto su capacidad inherente como las características del sismo. El espectro de capacidad es esencial para determinar si la estructura está diseñada adecuadamente para soportar los niveles de demanda sísmica, identificando puntos críticos donde la estructura podría fallar o necesitar refuerzos adicionales.

**Figura 22**

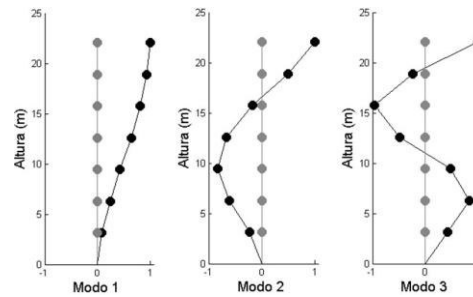
*Curvas de capacidad con varios patrones de carga.*



Fuente: (Vargas Alzate, 2013)

**Figura 23**

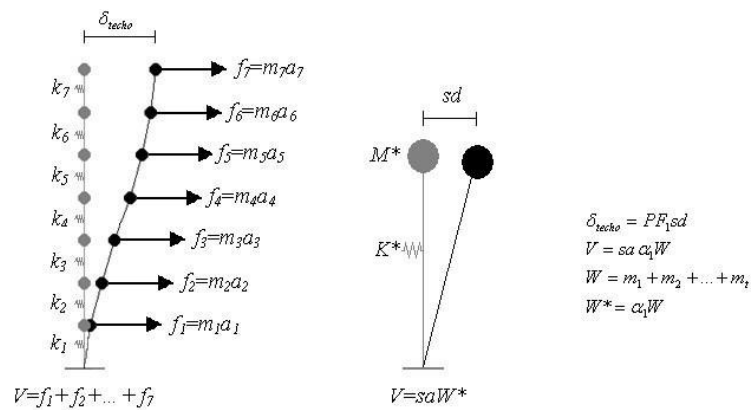
*Modos de vibración a partir del modelo estructural.*



Fuente: (Vargas Alzate, 2013)

**Figura 24**

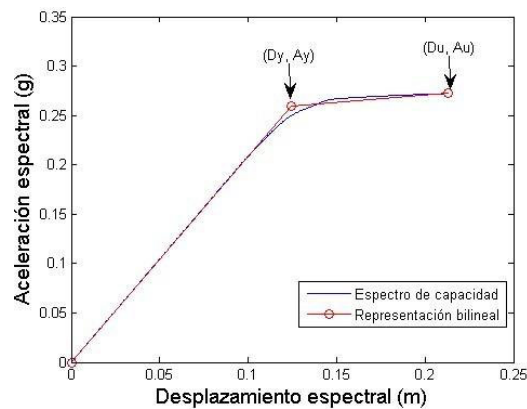
Modo fundamental de MDOF a un SDOF.



Fuente: (Vargas Alzate, 2013)

**Figura 25**

Espectro de capacidad obtenido a partir de la curva de capacidad.



Fuente: (Vargas Alzate, 2013)

### 2.3.6. Carga Sísmica

#### 2.3.6.1. Acción Sísmica.

La acción sísmica se refiere a las fuerzas dinámicas provocadas por un terremoto que afectan a las estructuras. Estas fuerzas, inducidas por el movimiento del suelo, se modelan comúnmente usando registros de aceleración de sismos reales, dada su naturaleza aleatoria y compleja. Para un análisis preciso del daño, es preferible utilizar estos registros reales en lugar

de enfoques deterministas. Además, se puede emplear un procedimiento que selecciona acelerogramas compatibles con un espectro de respuesta dado, optimizando la representación de la acción sísmica esperada en un diseño estructural. En áreas con baja sismicidad o escasez de registros, los acelerogramas artificiales pueden ser generados para suplir esta falta de información. Este enfoque permite una estimación más precisa de los efectos sísmicos en diferentes condiciones geológicas y estructurales.

#### **2.3.6.2. Amenaza sísmica y Parámetros Principales.**

L. Yamin, (2015) la amenaza sísmica se refiere a la probabilidad de que ocurra un terremoto en una región específica y con una intensidad suficiente para causar daños. Este concepto es fundamental en la evaluación del riesgo sísmico y se basa en estudios geológicos, sismológicos y modelos probabilísticos que analizan la actividad sísmica histórica y las características tectónicas de la zona.

*Parámetros Principales de la Amenaza Sísmica* De acuerdo con Bozorgnia & Bertero, (2004); Kramer, (1996):

- **Aceleración Máxima del Suelo (PGA):** Es la medida de la aceleración máxima que se espera que el suelo experimente durante un sismo. Es un parámetro crítico para el diseño sísmico de estructuras.
- **Espectro de Respuesta:** Representa cómo diferentes estructuras (con diferentes frecuencias naturales) responden a un movimiento sísmico, mostrando la aceleración, velocidad o desplazamiento máximo en función del período de la estructura.
- **Magnitud Sísmica:** Indica la cantidad de energía liberada durante un terremoto. A mayor magnitud, mayor es el potencial destructivo del sismo.

- Frecuencia de Ocurrencia: Refleja cuántas veces es probable que ocurran sismos de cierta magnitud en una región determinada durante un período específico.
- Distancia al Epicentro: Cuanto más cerca esté una estructura del epicentro de un terremoto, mayor será la intensidad del movimiento sísmico que experimentará.
- Condiciones del Suelo: Las características geológicas y del suelo en un sitio determinado pueden amplificar o reducir el impacto de un terremoto. Suelos blandos, por ejemplo, pueden amplificar las ondas sísmicas.

Estos parámetros se combinan para estimar la amenaza sísmica de una región, lo que permite a los ingenieros y planificadores diseñar y construir infraestructuras que puedan resistir los efectos de los terremotos.

### ***2.3.7. El Análisis Dinámico Incremental***

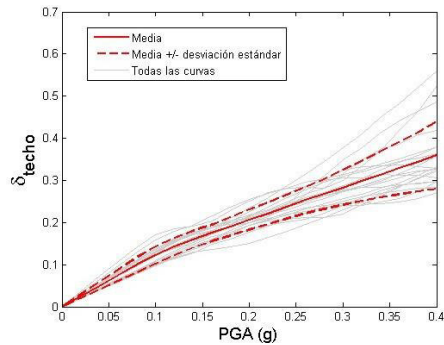
El análisis dinámico incremental (IDA), desarrollado por (Vamvatsikos & Allin Cornell, 2002), es un método avanzado en la ingeniería estructural que permite evaluar la respuesta sísmica de una estructura mediante la aplicación progresiva de cargas sísmicas incrementales. Este proceso implica someter un modelo estructural a una serie de registros sísmicos que se escalan gradualmente en intensidad, desde niveles bajos hasta niveles extremos. El objetivo del IDA es obtener una curva que relacione el parámetro de demanda (como desplazamiento máximo o rotación plástica) con la intensidad del sismo, permitiendo visualizar cómo la estructura se comporta desde el estado elástico hasta el colapso.

El IDA es particularmente útil para identificar el punto de colapso de la estructura y para evaluar la capacidad de resistencia de la misma bajo diferentes niveles de excitación sísmica. Además, ofrece una visión detallada del comportamiento inelástico de la estructura, permitiendo evaluar la fragilidad y la resiliencia sísmica, así como realizar comparaciones entre diferentes diseños o estrategias de reforzamiento. Esta metodología es fundamental para el

diseño de estructuras seguras y eficientes en regiones con alta actividad sísmica, ya que proporciona una evaluación detallada y precisa del comportamiento estructural bajo cargas extremas.

**Figura 26**

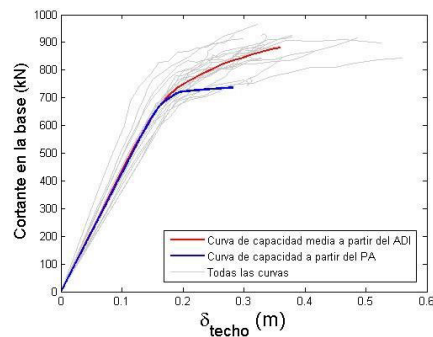
*Relación entre el PGA y el desplazamiento en el techo.*



Fuente: (Vargas Alzate, 2013)

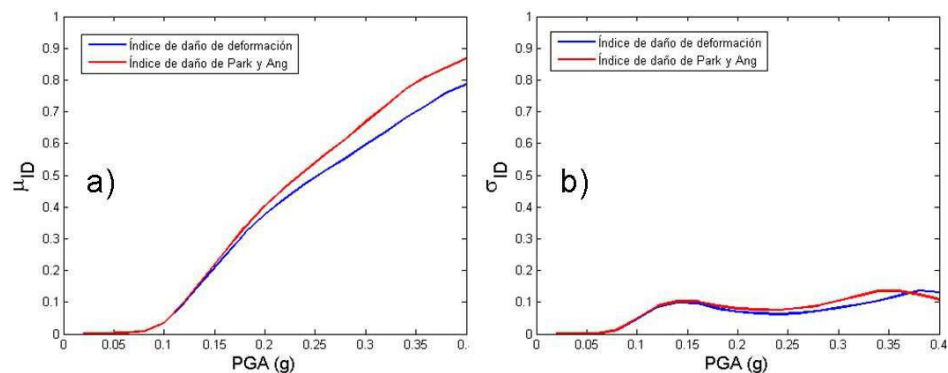
**Figura 27**

*Relación entre el cortante máximo y el desplazamiento máximo.*



**Figura 28**

*Ejemplo de índice de daño para diferentes condiciones.*



Fuente: (Vargas Alzate, 2013)

### 2.3.8. Matriz de Probabilidad de Daño

Garrido (2015) la Matriz de Probabilidad de Daño es una herramienta utilizada en ingeniería sísmica para evaluar el riesgo de daño en una estructura cuando se enfrenta a un evento sísmico. Esta matriz proporciona una representación probabilística de los diferentes estados de daño que una estructura puede experimentar bajo distintos niveles de intensidad sísmica. Cada celda de la matriz indica la probabilidad de que la estructura sufra un grado específico de daño, como leve, moderado, severo o colapso, dado un nivel particular de excitación sísmica. La matriz se construye a partir de datos obtenidos de análisis estructurales, simulaciones sísmicas y registros históricos de daños causados por terremotos. Los resultados permiten a los ingenieros y planificadores identificar las áreas de mayor vulnerabilidad dentro de la estructura y tomar decisiones informadas sobre reforzamientos, reparaciones o rediseños necesarios para reducir el riesgo. Además, la Matriz de Probabilidad de Daño es fundamental para la estimación de pérdidas económicas y la planificación de respuestas ante desastres, ya que proporciona una visión detallada de cómo es probable que una estructura se comporte bajo diversas condiciones sísmicas.

### **2.3.9. Resiliencia Sísmica de Sistemas Estructurales**

Gian et al. (2010) la Resiliencia Sísmica de Sistemas Estructurales se refiere a la capacidad de una estructura para soportar, resistir, y recuperarse de un evento sísmico, minimizando el daño y manteniendo su funcionalidad durante y después del terremoto. Este concepto va más allá de la simple resistencia estructural, integrando la capacidad de la estructura para adaptarse y recuperarse rápidamente de los impactos sísmicos. La resiliencia sísmica se evalúa a través de diversos indicadores como la capacidad de absorción de energía, el tiempo de recuperación, el grado de daño estructural, y la capacidad para mantener la operatividad post-sismo. Mediante la evaluación de la resiliencia, los ingenieros pueden diseñar sistemas estructurales que no solo protejan vidas, sino que también minimicen las interrupciones funcionales y económicas tras un terremoto. La resiliencia es crucial para garantizar que las estructuras críticas, como hospitales y edificios gubernamentales, puedan seguir operando y sirviendo a la comunidad en tiempos de crisis.

### **2.4. Base tecnológica.**

La Base Tecnológica en la ingeniería estructural y sísmica se refiere a la infraestructura, herramientas, metodologías, y conocimientos técnicos que sustentan el desarrollo, análisis, y aplicación de soluciones en el diseño, evaluación y mejora de sistemas estructurales. Esta base incluye el uso de tecnologías avanzadas de modelado y simulación, software especializado, técnicas de análisis dinámico y estático, y la implementación de materiales y métodos constructivos innovadores que permiten enfrentar los desafíos asociados con la actividad sísmica.

- 1) **Herramientas de Modelado y Simulación:** El uso de software de modelado y simulación es fundamental en la ingeniería moderna. Programas como SAP2000, ETABS, OpenSees, y ANSYS permiten crear modelos detallados de estructuras,

simular su comportamiento bajo diversas cargas, y analizar su respuesta ante diferentes escenarios sísmicos. Estas herramientas facilitan la realización de análisis dinámicos no lineales, simulaciones de pushover, y la evaluación del desempeño sísmico de las estructuras.

- 2) **Tecnologías de Materiales:** El desarrollo de nuevos materiales, como concretos de alta resistencia, aceros de alta ductilidad, y compuestos reforzados con fibra (FRP), ha revolucionado la capacidad de las estructuras para resistir eventos sísmicos. Estos materiales ofrecen mayor resistencia, ductilidad, y capacidad de absorción de energía, lo que mejora la resiliencia de las estructuras ante sismos. Además, la innovación en técnicas de construcción, como el uso de aisladores sísmicos y disipadores de energía, ha permitido diseñar estructuras que minimizan el daño y protegen a sus ocupantes durante un terremoto.
- 3) **Metodologías de Evaluación Sísmica:** La base tecnológica también incluye el desarrollo y la aplicación de metodologías avanzadas de evaluación sísmica, como el Análisis Dinámico Incremental (IDA), Análisis Estático No Lineal (Pushover Analysis), y el uso de Espectros de Capacidad. Estas metodologías permiten evaluar con precisión la capacidad de una estructura para soportar sismos, identificando puntos débiles y proporcionando información crítica para el diseño de refuerzos y mejoras.
- 4) **Sistemas de Monitoreo y Detección:** Los sistemas de monitoreo en tiempo real y las tecnologías de detección de daños estructurales son componentes clave de la base tecnológica en la ingeniería sísmica. Sensores, acelerómetros, y sistemas de monitoreo distribuidos permiten la detección temprana de daños y la evaluación continua del estado de una estructura, lo que es esencial para garantizar la seguridad y la capacidad de respuesta ante sismos.

- 5) **Metodologías de Gestión de Datos y Big Data:** La recopilación, análisis y gestión de grandes volúmenes de datos relacionados con la actividad sísmica y el rendimiento estructural es otra área clave de la base tecnológica. Big Data y las técnicas de análisis predictivo permiten predecir el comportamiento de las estructuras ante futuros sismos, identificar patrones de vulnerabilidad, y mejorar la planificación de medidas de mitigación de riesgos.
- 6) **Normativas y Códigos de Diseño Sísmico:** La base tecnológica también incluye el desarrollo y la actualización constante de normativas y códigos de diseño sísmico, que se basan en los últimos avances científicos y tecnológicos. Estas normativas guían a los ingenieros en el diseño de estructuras más seguras y resistentes, asegurando que las construcciones cumplan con los estándares de seguridad más recientes y estén preparadas para resistir eventos sísmicos de gran magnitud.

En conjunto, esta base tecnológica es esencial para el avance y la mejora continua de la ingeniería estructural y sísmica, proporcionando las herramientas y conocimientos necesarios para enfrentar los desafíos de diseñar y mantener infraestructuras seguras y resilientes ante terremotos. La integración de estas tecnologías en el proceso de diseño y evaluación estructural es fundamental para reducir el riesgo sísmico y proteger vidas y propiedades en todo el mundo.

### III. MÉTODO

#### 3.1. Tipo de investigación

##### 3.1.1. Tipo

- **De acuerdo con la orientación: Básica:** Esta investigación se centra en la generación de conocimiento teórico y la comprensión fundamental del fenómeno estudiado, sin una aplicación inmediata específica.
- **De acuerdo con la técnica de contrastación: Explicativa:** Busca explicar las relaciones de causa y efecto entre las variables del estudio, determinando por qué y cómo ocurren ciertos fenómenos.
- **De acuerdo con la direccionalidad: Prospectiva:** Esta investigación se enfoca en prever posibles resultados y desarrollos futuros basados en los datos y análisis actuales.
- **De acuerdo con el tipo de fuente de recolección: Retro-lectiva:** Se basa en la recolección de datos a partir de fuentes existentes o eventos ya ocurridos, realizando un análisis retrospectivo.
- **De acuerdo con la evolución del fenómeno estudiado: Transversal:** La investigación observa y analiza el fenómeno en un momento específico en el tiempo, sin considerar su evolución o cambios a lo largo del tiempo.
- **De acuerdo con la comparación de las poblaciones: Comparativa:** Compara diferentes grupos o poblaciones para identificar similitudes o diferencias en relación con las variables estudiadas.

### 3.1.2. Nivel

Este trabajo de investigación alcanza el nivel **predictivo-explicativo**, considerando que se orienta a identificar y prever posibles escenarios futuros en la respuesta sísmica de viviendas autoconstruidas. Es **predictivo** porque se busca determinar la probabilidad de futuros daños sísmicos y cuantificar las máximas pérdidas esperadas, lo que permitirá establecer un índice de resiliencia sísmica. Asimismo, es **explicativo** porque describe y analiza el comportamiento de las estructuras bajo diversas condiciones sísmicas, explicando las razones detrás de su desempeño y las posibles incertidumbres. Además, se aplican métodos como la simulación de Monte Carlo para integrar diversas variables aleatorias y correlacionar los resultados obtenidos en cada etapa de la metodología, lo que permite establecer relaciones claras entre las diferentes variables analizadas y sus impactos en la resiliencia estructural.(Hernández-Sampieri et al., 2010; Medina, 2014; Rinc, 2011).

### 3.1.3. Códigos y Nomenclaturas UNESCO

- 1206. Análisis Numérico
  - 120603. Análisis de Errores
- 2507. Geofísica
  - 250705. Sismología y Prospección Sísmica.
- 3305. Tecnología de la Construcción
  - 330506. Ingeniería Civil
  - 330532. Ingeniería Estructural
  - 330533. Resistencia de Estructuras
- 6307. Cambio y Desarrollo Social
  - 630706. Desarrollo Socioeconómico
  - 630707. Tecnología y cambio social.

### 3.1.4. *Diseño de la investigación*

Según Hernández-Sampieri et al. (2010) el diseño de la investigación en este estudio se centra en un enfoque no experimental, orientado a la observación de las viviendas autoconstruidas en su entorno natural, sin manipulación de variables. Dentro de este marco, se adopta un diseño transeccional o transversal, que consiste en la recolección de datos en un momento específico, lo que permite describir y analizar la incidencia y las interrelaciones entre las variables relacionadas con la resiliencia sísmica de estas viviendas.

El diseño se estructura en varias categorías:

- **Diseño No Experimental:** Este enfoque se implementa sin manipulación deliberada de variables, observando las condiciones y características de las viviendas autoconstruidas tal como se presentan en su entorno natural, para proceder a un análisis detallado de sus vulnerabilidades y capacidades de resiliencia.
- **Diseño Transeccional o Transversal:** Este diseño implica la recolección de datos en un único momento en el tiempo, con el objetivo de describir las variables relevantes a la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas y analizar cómo estas variables se interrelacionan en ese momento específico.
- **Diseño Transeccional Descriptivo:** El propósito de este diseño es explorar la incidencia y los valores en que se manifiestan las variables de interés, como la calidad de la construcción y la vulnerabilidad sísmica, proporcionando un análisis exhaustivo de su comportamiento en un tiempo determinado.
- **Diseño Transeccional Correlacional-Causal:** Este diseño busca establecer relaciones entre dos o más variables, como la calidad de la construcción y la capacidad de recuperación tras un evento sísmico, en un momento determinado. Aunque se enfoca en la descripción de las variables, también explora las relaciones correlacionales o

causales entre ellas, ofreciendo una comprensión más profunda de cómo estos factores afectan la resiliencia de las viviendas autoconstruidas.

Este enfoque metodológico es fundamental para lograr una comprensión exhaustiva de la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas, permitiendo una evaluación precisa de las interrelaciones entre las variables clave del estudio.

## **3.2. Población y muestra**

### **3.2.1. Población**

La población de estudio en una investigación refiere al conjunto de todas las unidades cuyas características son objeto de análisis y observación. En este contexto, la población objetivo de este estudio está compuesta por sistemas estructurales, específicamente edificios residenciales autoconstruidos de 2, 4 y 6 pisos. Estos sistemas se analizan considerando la amenaza sísmica a la que están expuestos, evaluados a través de diversas variables como el Parámetro de Intensidad sísmica (PIS), Parámetro de Demanda Sísmica (PDS), Estados de Daño (ED) y la Pérdida Económica o Costo de Reparación (P). Estas variables han sido seleccionadas cuidadosamente para describir y entender el fenómeno de interés en relación con su contenido, lugar y tiempo de ocurrencia. Tal enfoque permitirá no solo describir, sino también analizar profundamente la respuesta de estas estructuras ante eventos sísmicos, contribuyendo así al cuerpo de conocimiento sobre la resistencia y vulnerabilidad de edificaciones autoconstruidas frente a terremotos (Hernández-Sampieri et al., 2010; Viteri, 2012).

### **3.2.2. Tamaño de la Muestra**

Para esta investigación, la muestra, se mediante un enfoque no probabilístico e intencional. Según Hernández-Sampieri et al. (2010) el muestreo no probabilístico no se basa

en métodos matemáticos de probabilidad, sino que permite al investigador seleccionar los casos que se incluirán en la muestra según su criterio y relevancia para los objetivos del estudio. En particular, se utilizarán muestras intencionadas, caracterizadas por la selección deliberada y juiciosa del investigador, quien escoge las unidades de estudio que considera más representativas o informativas para abordar la investigación.

### **3.2.3. Muestreo**

Para el muestreo en esta investigación, se seleccionarán tres edificios de viviendas autoconstruidas, específicamente estructuras de 2, 4 y 6 pisos, conforme a las recomendaciones establecidas por FEMA en 2003. El criterio para la selección se considera la representatividad de estas estructuras en términos de variabilidad estructural y exposición a riesgos sísmicos. Además, la diferenciación en el comportamiento sísmico de estos edificios será analizada a través de la aplicación de señales sísmicas. De acuerdo con el estándar ASCE 41-13, se utilizarán 11 pares de señales sísmicas para evaluar la respuesta de cada estructura. Es importante señalar que, según las directrices de la ASCE, el número recomendado de señales a aplicar en cada una de las dos direcciones principales de los edificios es de 11, asegurando así un análisis exhaustivo y detallado de la respuesta sísmica de las estructuras seleccionadas.

## **3.3. Operacionalización de variables**

### **3.3.1. Estrategia de Prueba de Hipótesis**

Las pruebas de hipótesis en este estudio se realizarán con el objetivo de emitir un juicio sobre las diferencias entre el estadístico de muestra y un valor preestablecido. Este análisis permitirá tomar decisiones informadas respecto a las hipótesis formuladas en esta investigación.

### 3.3.1.1. Estrategias de la Prueba de Hipótesis Nula Principal

Las viviendas autoconstruidas no exhibirán un grado variable de resiliencia sísmica frente a sismos de moderada a alta intensidad.

### 3.3.1.2. Estrategias de la Prueba de Hipótesis Nula Secundaria

#### **Hipótesis Secundaria 1.**

$H_0$ : Las viviendas autoconstruidas con atributos de diseño físico y estructural más robustos serán menos propensas a sufrir daños durante un sismo.

$H_1$ : Las viviendas autoconstruidas con atributos de diseño físico y estructural más robustos no serán menos propensas a sufrir daños durante un sismo.

#### **Hipótesis Secundaria 2.**

$H_0$ : La autoconstrucción tendrá un impacto negativo en la seguridad estructural y la resistencia sísmica de las edificaciones.

$H_1$ : La autoconstrucción no tendrá un impacto negativo en la seguridad estructural y la resistencia sísmica de las edificaciones.

#### **Hipótesis Secundaria 3.**

$H_0$ : El índice de resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas será determinado por factores como la calidad de la construcción y las prácticas de mantenimiento.

$H_1$ : El índice de resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas no será determinado por factores como la calidad de la construcción y las prácticas de mantenimiento.

### 3.3.1.3. Demostrar la Hipótesis Nula.

El proceso para demostrar la hipótesis nula se lleva a cabo mediante una serie de pasos sistemáticos y organizados que aseguran la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos. Este procedimiento consta de los siguientes diez pasos:

- **Hipótesis Nulas:** Se define claramente la hipótesis nula ( $H_0$ ), que representa la afirmación que se desea contrastar o probar. Esta hipótesis generalmente sostiene que no existe un efecto significativo o que no hay diferencia entre los grupos o variables en estudio.
- **Hipótesis Alternativas:** Se formula la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), que es la contraparte de la hipótesis nula y que se acepta si la hipótesis nula es rechazada. Esta hipótesis sugiere la existencia de un efecto o una diferencia significativa.
- **Nivel de Significancia:** Se determina el nivel de significancia ( $\alpha$ ), que es la probabilidad máxima permitida de cometer un error tipo I, es decir, rechazar la hipótesis nula cuando en realidad es verdadera. Comúnmente, se utiliza un nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ).
- **Tamaño de la Muestra:** Se calcula el tamaño de la muestra necesario para garantizar que los resultados sean representativos y que la prueba estadística tenga el poder suficiente para detectar efectos o diferencias significativas.
- **Valores Críticos:** Se identifican los valores críticos que definen las regiones de rechazo y no rechazo para la prueba estadística seleccionada. Estos valores dependen del nivel de significancia y de la distribución de la prueba.
- **Prueba Estadística:** Se selecciona la prueba estadística más adecuada para el tipo de datos y las hipótesis planteadas. Las pruebas comunes incluyen la prueba t de Student, ANOVA, chi-cuadrado, entre otras.

- **Recolección y Almacenamiento de Datos:** Se recopilan y organizan los datos necesarios para llevar a cabo la prueba estadística. Estos datos son fundamentales para calcular los valores de las muestras y compararlos con los valores críticos.
- **Regla de Decisión:** Se establece una regla de decisión que guiará la aceptación o rechazo de la hipótesis nula. Esta regla se basa en la comparación del valor estadístico calculado con los valores críticos establecidos.
- **Decisión Estadística:**
  - **No se Rechaza la Hipótesis Nula:** Si el valor estadístico calculado cae dentro de la región de no rechazo, se concluye que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula.
  - **Se Rechaza la Hipótesis Nula:** Si el valor estadístico calculado cae dentro de la región de rechazo, se concluye que hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.
- **Decisión Estadística en Términos del Problema:** Finalmente, se interpreta la decisión estadística en el contexto del problema de investigación. Se explica cómo los resultados afectan las conclusiones del estudio y qué implicaciones tienen para la hipótesis original y el conocimiento general del tema.

Este procedimiento garantiza un enfoque estructurado y riguroso para evaluar la hipótesis nula, proporcionando un marco claro para la toma de decisiones basada en datos y análisis estadístico.

#### 3.3.1.4. Modelo Estadístico para la Prueba de la Hipótesis

El modelo estadístico para usar será...

$$Z = \frac{\hat{p}_1 - \hat{p}_2}{\sqrt{\hat{p}(1-\hat{p})\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad T = \frac{\bar{D}}{S_D / \sqrt{n}}$$

### **3.3.2. *Variables e Indicadores***

Este proceso consistirá en la conversión de conceptos abstractos en términos concretos, observables y medibles, transformándolos en dimensiones e indicadores. Además, se compone de una serie de procedimientos o instrucciones para medir las variables definidas conceptualmente, con el objetivo de obtener la máxima información posible y asegurar que su sentido y adecuación sean pertinentes al contexto de esta investigación.

**Tabla 21** Variables e indicadores – Operacionalización de variables: Análisis cuantitativa.

Hipótesis	Variable	Indicadores	Descripción	Dimensión tipo-función	Escala	Nivel
<b>H - Principal</b>	Resiliencia sísmica	Funcionalidad	Mide la capacidad del sistema para continuar operando post-sismo	Log-normal o Beta	Continua y creciente con el estado de daño relación Intensidad	Baja, Media, Moderada, Alta
		Costo de reposición y reparación	Estima los costes económicos para reparar o reemplazar estructuras	Log-normal o Beta		
		Tiempos de reposición y reparación	Tiempo requerido para reparar o reemplazar elementos dañados	Log-normal o Beta		
<b>H1 – Secundaria</b>	Vulnerabilidad	Intensidad sísmica (parámetros de intensidad)	Evalúa la severidad del sismo y su impacto en las estructuras	Log-normal o Beta	Continua y creciente con el estado de daño relación Intensidad - IDA	Baja, Media, Moderada, Alta, Colapso
		Desempeño sísmico (Rigidez, Resistencia, ductilidad)	Analiza cómo las estructuras soportan y deforman durante un sismo	Log-normal o Beta		
		Incertidumbres en las señales sísmicas	Mide las variabilidades en la predicción de respuesta sísmica	Log-normal o Beta		
<b>H2 – Secundaria</b>	Estado de Daño	Grado de fisuración	Evalúa la severidad de los daños estructurales visibles	Log-normal	Discreta entre estados de daño	Leve, Moderado, Severo, Completo
		Función de fragilidad	Probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño dado	Log-normal		
		Incertidumbre en la función de fragilidad	Variabilidad en la estimación de la función de fragilidad	Log-normal		
<b>H3 – Secundaria</b>	Parámetros de Demanda sísmica	Derivas máximas de entrepiso	Mide las deformaciones verticales máximas durante un sismo	Log-normal	Continua y creciente con la intensidad sísmica	IDA, Espectro de capacidad, Espectro de demanda, Parámetros sismos
		Aceleración absoluta máxima en pisos	Evalúa las aceleraciones máximas experimentadas en los pisos	Log-normal		
		Rotaciones inelásticas en rótulas plásticas	Mide las deformaciones permanentes en conexiones críticas	Log-normal		
		Fuerzas cortantes máximas en elementos	Evalúa las fuerzas máximas soportadas por elementos estructurales	Log-normal		
		Deriva residual	Analiza la deformación permanente post-sismo de las estructuras	Log-normal		
		Incertidumbres de PDS	Estudia la variabilidad en la predicción de la demanda sísmica	Log-normal		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22

*Variables e indicadores – Operacionalización de variables – Análisis cualitativa.*

Hipótesis	Variable	Indicadores	Descripción	Dimensión tipo de función	Escala	Nivel
<b>H Principal</b>	Resiliencia sísmica	Índice de Resiliencia Sísmica (IRS)	Evalúa la capacidad de la vivienda para resistir y recuperarse de un sismo.	Log-normal o Beta	Continua y creciente con el estado de daño relación Intensidad	Baja, Media, Moderada, Alta
<b>H1 Secundaria</b>	Robustez del diseño físico y estructural	Propensión a sufrir daños	Mide cómo las características robustas del diseño afectan la vulnerabilidad sísmica de la vivienda.	Log-normal o Beta	Continua	Baja, Media, Alta
<b>H2 Secundaria</b>	Impacto de la autoconstrucción	Seguridad estructural y resistencia sísmica	Evalúa el impacto negativo de las prácticas de autoconstrucción en la seguridad y resistencia de las edificaciones.	Log-normal o Beta	Continua	Baja, Media, Alta
<b>H3 Secundaria</b>	Metodología de evaluación	Eficacia de la metodología	Determina la efectividad de la metodología propuesta para evaluar la resiliencia sísmica.	Log-normal o Beta	Continua	Funcional, No funcional
<b>H4 Secundaria</b>	Factores determinantes de la resiliencia	Calidad de la construcción y prácticas de mantenimiento	Mide cómo la calidad de la construcción y las prácticas de mantenimiento afectan el índice de resiliencia sísmica.	Log-normal o Beta	Continua y variable	Baja, Media, Alta

Fuente: Elaboración propia.

### **3.4. Técnicas e Instrumentos**

#### ***3.4.1. Técnicas de Procesamiento de Datos.***

El procesamiento de datos en esta investigación se llevará a cabo mediante técnicas como el procesamiento por lotes y en tiempo real, apoyado por la arquitectura Lambda, para gestionar y analizar grandes volúmenes de información de manera eficiente. Se utilizarán herramientas especializadas como SPSS, Funvul y Performance 3D para realizar cálculos avanzados y generar reportes detallados, asegurando un análisis preciso de la resiliencia sísmica de las estructuras. Estos métodos permitirán presentar resultados claros y fundamentados, esenciales para las conclusiones del estudio.

#### ***3.4.2. Técnicas de Análisis e Interpretación de la Información.***

El análisis y la interpretación de la información en esta investigación se realizarán mediante un enfoque metodológico riguroso que permita extraer conclusiones significativas a partir de los datos recolectados. Las técnicas empleadas se detallan a continuación:

- Análisis Estadístico Descriptivo:
  - Descripción: Se utilizarán técnicas de estadística descriptiva para resumir y organizar los datos, proporcionando una visión general de las principales características de la información recolectada. Esto incluirá el cálculo de medidas de tendencia central (media, mediana, moda), medidas de dispersión (desviación estándar, varianza), y la elaboración de tablas y gráficos que faciliten la comprensión de los datos.
  - Aplicación: Este análisis servirá como base para identificar patrones generales en los datos y preparar la información para análisis más complejos.

- **Análisis Correlacional:**
  - Descripción: Se aplicarán técnicas de correlación para determinar la relación entre las diferentes variables del estudio. Esto permitirá identificar la fuerza y dirección de las asociaciones entre variables, lo que es fundamental para entender cómo se interrelacionan los diferentes factores en el contexto de la resiliencia sísmica.
  - Aplicación: El análisis correlacional será clave para establecer conexiones entre variables como la intensidad sísmica, el daño estructural y los indicadores de resiliencia, proporcionando una base sólida para interpretar los resultados.
  
- **Análisis de Regresión:**
  - Descripción: Se emplearán modelos de regresión para predecir el comportamiento de una variable dependiente en función de una o más variables independientes. Esto permitirá evaluar cómo factores específicos influyen en los resultados observados.
  - Aplicación: Este análisis será utilizado para modelar y prever el impacto de diferentes variables sobre la resiliencia sísmica, ayudando a cuantificar el efecto de cada factor.
  
- **Análisis de Simulación mediante el Método de Monte Carlo:**
  - Descripción: Se utilizará la simulación de Monte Carlo para modelar la incertidumbre en las predicciones de daño y resiliencia. Este método permite realizar simulaciones repetidas que consideran la variabilidad de las variables, proporcionando un rango de posibles resultados.

- Aplicación: Esta técnica será fundamental para evaluar la resiliencia sísmica bajo diferentes escenarios, integrando la incertidumbre en las estimaciones de daño y tiempo de recuperación.
- Interpretación Contextualizada de Resultados:
  - Descripción: La interpretación de los resultados se realizará en función del contexto específico del estudio, considerando tanto las características particulares de las estructuras analizadas como el marco teórico de la investigación.
  - Aplicación: La interpretación contextualizada permitirá conectar los hallazgos con la realidad práctica, facilitando la formulación de recomendaciones y conclusiones aplicables al ámbito de la ingeniería sísmica.

Estas técnicas de análisis e interpretación permitirán desglosar la información de manera sistemática, asegurando que los resultados sean precisos, significativos y directamente aplicables al problema de investigación sobre la resiliencia sísmica de las estructuras.

#### ***3.4.3. Instrumentos de Recolección de Datos según la Metodología.***

Para garantizar la precisión y la validez de los datos recolectados en esta investigación, se emplearán diversos instrumentos adaptados a la metodología del estudio, que permitirán capturar información relevante y detallada sobre la resiliencia sísmica de las estructuras. A continuación, se describen los principales instrumentos utilizados:

- Cuestionarios y Encuestas Estructuradas:
  - Descripción: Se diseñarán cuestionarios y encuestas estructuradas que serán aplicados a profesionales y expertos en ingeniería sísmica y estructural.

Estos instrumentos incluirán preguntas cerradas y abiertas, orientadas a obtener información cualitativa y cuantitativa sobre la percepción del riesgo sísmico, el estado de las estructuras, y las prácticas actuales en el diseño y refuerzo estructural.

- Aplicación: Los cuestionarios y encuestas se utilizarán para recopilar datos sobre las variables clave de la investigación, como el nivel de preparación ante sismos y la evaluación de la capacidad de recuperación de las edificaciones.
- Revisión Documental y Análisis de Registros Históricos:
  - Descripción: Este instrumento consistirá en la recopilación y análisis de documentos técnicos, normativas, informes de daño sísmico, y registros históricos de sismos pasados. Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura y los estudios previos para contextualizar y complementar los datos obtenidos mediante otros instrumentos.
  - Aplicación: La revisión documental permitirá obtener información crítica sobre el comportamiento sísmico de estructuras similares, las metodologías aplicadas en investigaciones anteriores, y los antecedentes normativos que influyen en el diseño y evaluación de la resiliencia estructural.
- Simulaciones Computacionales:
  - Descripción: Se utilizarán herramientas de simulación como SAP2000, ETABS, y OpenSees para modelar el comportamiento de las estructuras bajo diferentes escenarios sísmicos. Las simulaciones permitirán realizar análisis dinámicos y estáticos no lineales, generando datos sobre desplazamientos, fuerzas internas, y posibles fallas estructurales.

- Aplicación: Estas simulaciones serán esenciales para evaluar la resiliencia de las estructuras al someterlas a eventos sísmicos simulados, proporcionando una base para la estimación de daños y la validación de los modelos teóricos.
- Inspección Visual y Levantamiento de Campo:
  - Descripción: Este instrumento implica la realización de inspecciones visuales y levantamientos de campo en las estructuras seleccionadas para el estudio. Se utilizarán formatos estandarizados para documentar las condiciones físicas, las características constructivas, y los daños observables en las edificaciones.
  - Aplicación: Las inspecciones visuales permitirán validar los datos obtenidos por otros medios, detectar vulnerabilidades estructurales no documentadas previamente, y complementar la información recopilada mediante simulaciones y cuestionarios.

Estos instrumentos de recolección de datos han sido seleccionados para asegurar que la información recopilada sea completa, precisa, y relevante para los objetivos de la investigación. Cada instrumento se aplicará de manera sistemática y alineada con la metodología establecida, garantizando que los datos obtenidos sean confiables y adecuados para el análisis posterior.

#### ***3.4.4. Validación de los Instrumentos***

La validación de los instrumentos de recolección de datos es un paso crucial en la investigación, ya que asegura que las herramientas utilizadas sean fiables, precisas y capaces de captar la información necesaria para cumplir con los objetivos del estudio. En este contexto, se emplearán los siguientes métodos para validar los instrumentos utilizados:

- Validez de Contenido:

- Descripción: Este tipo de validación se enfocará en asegurarse de que los instrumentos de recolección de datos cubran de manera exhaustiva todos los aspectos relevantes del fenómeno de estudio. Se revisará que las preguntas de los cuestionarios, los indicadores utilizados en las simulaciones y las variables observadas durante las inspecciones visuales sean pertinentes y abarquen la totalidad del concepto de resiliencia sísmica.
- Procedimiento: Un panel de expertos en ingeniería estructural y sísmica revisará los instrumentos para verificar que los contenidos sean adecuados y representen correctamente las dimensiones teóricas del estudio. Se harán ajustes según sus recomendaciones.
- Validez de Constructo:
  - Descripción: Se evaluará que los instrumentos realmente midan los conceptos teóricos que se pretenden estudiar, como la resiliencia sísmica, la vulnerabilidad estructural, y la capacidad de recuperación. Este tipo de validación asegura que los instrumentos no solo cubran el contenido necesario, sino que también sean coherentes con la teoría subyacente.
  - Procedimiento: Se aplicarán técnicas estadísticas, como análisis factoriales, para verificar que las preguntas o ítems de los cuestionarios, y los parámetros utilizados en las simulaciones, estén alineados con los constructos teóricos y reflejen de manera precisa las variables de interés.
- Validez de Criterio:
  - Descripción: Esta validación evaluará la eficacia de los instrumentos comparándolos con otros métodos o instrumentos ya establecidos y validados previamente. Por ejemplo, los resultados obtenidos de

simulaciones computacionales se contrastarán con datos empíricos de sismos anteriores o con estudios similares realizados en otros contextos.

- Procedimiento: Se utilizarán correlaciones y comparaciones con datos históricos para determinar la validez de criterio, asegurando que los instrumentos aplicados en la investigación producen resultados consistentes y comparables con los estándares del campo.
- Prueba Piloto:
  - Descripción: Se realizará una prueba piloto en un subconjunto de la población o en estructuras seleccionadas para verificar la funcionalidad de los instrumentos antes de su aplicación a gran escala. Esto permite identificar posibles problemas o áreas de mejora en los instrumentos antes de su implementación definitiva.
  - Procedimiento: Los instrumentos serán aplicados en un entorno controlado para evaluar su desempeño y efectuar los ajustes necesarios. Se analizarán los datos obtenidos en la prueba piloto para identificar inconsistencias o dificultades en la recolección de datos.
- Confiabilidad (Consistencia Interna):
  - Descripción: La confiabilidad se refiere a la consistencia de los instrumentos en la medición de lo que se pretende medir. Se evaluará la consistencia interna de los cuestionarios y otros instrumentos a través de coeficientes de confiabilidad como el alfa de Cronbach.
  - Procedimiento: Se calculará el coeficiente alfa de Cronbach para cada conjunto de ítems relacionados en los cuestionarios y encuestas. Un alfa de

Cronbach de 0.7 o superior se considerará aceptable, indicando que los instrumentos son fiables.

- Validez Externa:
  - Descripción: Este tipo de validación se enfocará en asegurar que los resultados obtenidos mediante los instrumentos sean generalizables a otras poblaciones o contextos similares fuera del estudio específico.
  - Procedimiento: Se compararán los resultados con estudios realizados en contextos diferentes para evaluar la aplicabilidad y generalización de los hallazgos, asegurando que los instrumentos pueden ser utilizados de manera confiable en diversas situaciones.

La combinación de estos métodos de validación garantizará que los instrumentos de recolección de datos utilizados en la investigación sean robustos, confiables y adecuados para captar la información necesaria para analizar la resiliencia sísmica de las estructuras estudiadas.

### **3.5. Procedimientos**

#### ***3.5.1. Procesamiento de Datos***

El procesamiento de datos en esta investigación se realizará mediante técnicas de procesamiento por lotes y en tiempo real, utilizando la arquitectura Lambda para garantizar un manejo eficiente de grandes volúmenes de información estructural y sísmica. Para el tratamiento y análisis de los datos se emplearán herramientas especializadas como SPSS, que permitirá realizar análisis estadísticos avanzados; Funvul, para el cálculo de vulnerabilidad estructural; y Performance 3D, orientado al modelado dinámico no lineal de estructuras. Estas herramientas permitirán obtener resultados precisos y generar reportes detallados, esenciales para evaluar la resiliencia sísmica de las edificaciones.

### ***3.5.2. Análisis e Interpretación de la Información***

El análisis de la información se llevará a cabo mediante un enfoque estadístico y computacional riguroso, con técnicas que permitan interpretar con claridad los datos recolectados. En primer lugar, se aplicará estadística descriptiva para organizar y resumir la información a través de medidas como la media, desviación estándar, y gráficos representativos. Posteriormente, se empleará análisis correlacional con el objetivo de identificar relaciones significativas entre variables como intensidad sísmica, daño estructural e indicadores de resiliencia. Asimismo, se utilizarán modelos de regresión para predecir el comportamiento de la resiliencia en función de variables independientes relevantes. Para incorporar la incertidumbre en el análisis, se aplicará la simulación de Monte Carlo, que permitirá evaluar diferentes escenarios de riesgo. Finalmente, los resultados serán interpretados de forma contextualizada, considerando las características particulares de las estructuras y el entorno de estudio, a fin de emitir conclusiones aplicables al campo de la ingeniería sísmica.

### ***3.5.3. Recolección de Datos según la Metodología***

La recolección de datos se efectuará mediante instrumentos diseñados de acuerdo con los objetivos y enfoque metodológico de la investigación. Se aplicarán cuestionarios y encuestas estructuradas dirigidas a profesionales del ámbito de la ingeniería estructural y sísmica, a fin de obtener información tanto cualitativa como cuantitativa sobre prácticas constructivas, percepción del riesgo y evaluación de resiliencia. Paralelamente, se realizará una revisión documental exhaustiva de normativas técnicas, registros históricos y estudios previos que aporten antecedentes relevantes. Se complementará esta etapa con simulaciones computacionales en programas como SAP2000, ETABS y OpenSees, que permitirán modelar la respuesta estructural bajo diferentes escenarios sísmicos. Finalmente, se llevará a cabo una inspección visual de campo, con levantamientos técnicos en edificaciones seleccionadas, lo

que permitirá validar datos obtenidos por otros medios y detectar vulnerabilidades no documentadas previamente.

#### **3.5.4. Validación de los Instrumentos**

Para asegurar la fiabilidad y pertinencia de los instrumentos empleados, se aplicará un proceso riguroso de validación. En primer lugar, se evaluará la validez de contenido mediante revisión por expertos en ingeniería sísmica, quienes verificarán la cobertura y relevancia de los ítems respecto al constructo de resiliencia. Luego, se aplicará la validez de constructo, utilizando técnicas estadísticas como análisis factorial, para confirmar que los instrumentos miden efectivamente las variables teóricas planteadas. La validez de criterio se evaluará comparando los resultados obtenidos con datos empíricos o investigaciones similares. Además, se realizará una prueba piloto en una muestra representativa, permitiendo identificar posibles errores o mejoras en los instrumentos antes de su aplicación definitiva. Para garantizar la confiabilidad, se calculará el coeficiente alfa de Cronbach, donde valores iguales o superiores a 0.7 serán considerados aceptables. Finalmente, se analizará la validez externa, contrastando los resultados del estudio con investigaciones en contextos similares, con el fin de asegurar la generalización de los hallazgos.

#### **3.6. Análisis de datos**

El análisis de los datos recolectados implicará varias operaciones estratégicas, diseñadas para cumplir con los objetivos del estudio:

- Descripción y resumen de datos: Resumir las características principales de los datos recogidos.
- Identificación de relaciones entre variables: Explorar cómo las variables están interrelacionadas.

- Comparación de variables: Evaluar las diferencias y similitudes entre grupos de variables.
- Detección de diferencias entre variables: Establecer variaciones estadísticamente significativas entre las variables estudiadas.
- Proyección de resultados: Utilizar los datos analizados para pronosticar y prever resultados futuros.

### **3.7. Consideraciones éticas**

En el desarrollo de esta investigación, se tomarán en cuenta estrictas consideraciones éticas para asegurar que todos los procedimientos y actividades se lleven a cabo de manera responsable, respetando los derechos y la dignidad de todas las personas y entidades involucradas. A continuación, se detallan las principales consideraciones éticas:

- Confidencialidad y Anonimato:
  - Descripción: Se garantizará la confidencialidad de la información recolectada, protegiendo la identidad de los participantes y asegurando que los datos sensibles no sean divulgados sin consentimiento. Los datos serán almacenados en sistemas seguros y accesibles solo para el equipo de investigación autorizado.
  - Procedimiento: Durante la recolección y análisis de datos, se codificarán las respuestas de los participantes para que no puedan ser identificados. Además, cualquier publicación de resultados se realizará de manera que no comprometa la privacidad de los individuos o instituciones involucradas.
- Consentimiento Informado:

- Descripción: Se obtendrá el consentimiento informado de todos los participantes antes de su inclusión en el estudio. Los participantes serán plenamente informados sobre los objetivos de la investigación, los procedimientos a seguir, los riesgos y beneficios potenciales, y su derecho a retirarse del estudio en cualquier momento.
- Procedimiento: Se proporcionará a los participantes un documento de consentimiento informado que deberán firmar, en el cual se detalla toda la información relevante sobre el estudio. Este proceso garantizará que los participantes tomen decisiones informadas y voluntarias sobre su participación.
- Respeto y Consideración hacia los Participantes:
  - Descripción: Todos los participantes serán tratados con respeto, dignidad y consideración durante todo el proceso de investigación. Se evitará cualquier tipo de coerción o presión para participar, y se respetarán las opiniones y decisiones de los participantes en todo momento.
  - Procedimiento: Se mantendrá una comunicación clara y abierta con los participantes, respondiendo a cualquier duda o preocupación que puedan tener, y asegurando un entorno de confianza y respeto durante las interacciones.
- Uso Responsable de la Información:
  - Descripción: La información recolectada será utilizada exclusivamente para los fines de esta investigación, y se evitará cualquier uso indebido que pueda dañar a los participantes o a las instituciones involucradas. Los datos se manejarán de acuerdo con las normativas legales y éticas vigentes.

- Procedimiento: Se implementarán controles estrictos para el acceso y uso de los datos, asegurando que solo se utilicen para los propósitos establecidos en la investigación. Además, se eliminarán o destruirán los datos una vez finalizado el estudio, si así lo solicitan los participantes o si ya no son necesarios.
- Transparencia y Honestidad en la Presentación de Resultados:
  - Descripción: Se asegurará que los resultados de la investigación sean presentados de manera transparente y honesta, evitando cualquier forma de manipulación o falsificación de datos. Los resultados se presentarán tal como fueron obtenidos, respetando la integridad científica.
  - Procedimiento: Se realizarán revisiones internas y se aplicarán controles de calidad durante el análisis de datos y la redacción de informes para garantizar la precisión y veracidad de los resultados. Cualquier limitación o posible sesgo en el estudio será claramente indicado en las publicaciones.
- Cumplimiento de Normativas y Regulaciones Éticas:
  - Descripción: La investigación se llevará a cabo cumpliendo con todas las normativas y regulaciones éticas locales e internacionales aplicables, incluyendo aquellas establecidas por comités de ética y organizaciones profesionales de ingeniería y ciencias.
  - Procedimiento: Se someterá el proyecto de investigación a la revisión de un comité de ética, si es requerido, y se obtendrán todas las autorizaciones y aprobaciones necesarias antes de iniciar la recolección de datos. Se seguirá estrictamente cualquier directriz adicional proporcionada por estos comités.

Estas consideraciones éticas forman la base sobre la cual se desarrollará esta investigación, asegurando que se realice de manera responsable, respetuosa y alineada con los más altos estándares de integridad científica.

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Introducción.

Este estudio desarrolla un procedimiento riguroso para determinar los índices de resiliencia sísmica de viviendas autoconstruidas en Perú, enfocándose en estructuras de pórticos resistentes a momentos en edificaciones de 2, 4 y 6 pisos. El enfoque metodológico combina evaluaciones cualitativas y cuantitativas, comenzando con una caracterización exhaustiva de los sistemas estructurales en la ciudad de Lima. En el marco de esta investigación, seleccionamos 120 viviendas autoconstruidas en los distritos de Los Olivos, San Juan de Lurigancho, Pueblo Libre y Breña. Una evaluación preliminar cualitativa de las funciones de vulnerabilidad se complementó con un análisis no lineal detallado para tres edificios prototipo, describiendo meticulosamente los pasos seguidos para calcular los índices de resiliencia.

**Caracterización de las Viviendas:** La caracterización de las 120 viviendas proporcionó una visión profunda sobre los métodos constructivos locales, evaluando aspectos como la calidad de la construcción, la supervisión técnica, la planificación previa, la calidad de la mano de obra, las etapas de construcción, la antigüedad de las edificaciones y el número de pisos. Se realizó también una evaluación de la calidad del concreto en componentes estructurales críticos como columnas, vigas y losas mediante un esclerómetro para medir la resistencia a la compresión del concreto. **Modelado y Análisis Matemático:** Del total de viviendas analizadas, se seleccionaron modelos de tres edificios de 2, 4 y 6 pisos para realizar un modelado matemático preciso. Este modelo permitió determinar parámetros de demanda sísmica, estableciendo funciones de fragilidad, vulnerabilidad y, por último, índices de resiliencia. **Evaluación Cualitativa y Cuantitativa:** Desde una perspectiva cualitativa, se evaluó la robustez del diseño estructural y el impacto negativo de las prácticas de autoconstrucción en la seguridad

y resistencia de las edificaciones. Se analizaron los factores que influyen en la resiliencia, tales como la calidad de la construcción y las prácticas de mantenimiento, categorizándolos en índices de baja, media y alta resiliencia.

El análisis cuantitativo se enfocó en el modelado matemático de los sistemas estructurales seleccionados, determinando parámetros de demanda sísmica y estados de daño para desarrollar los índices de resiliencia sísmica. Se utilizaron indicadores como deriva residual, fuerzas cortantes máximas, rotaciones inelásticas en rótulas plásticas, aceleraciones en pisos, y derivas de entrepiso. Estos elementos son fundamentales para evaluar el desempeño y la intensidad sísmicos medida como parámetro de intensidad, culminando en la determinación de la funcionalidad a partir de los costos de reposición y tiempos de reposición. Finalmente, este estudio no solo proporciona un método riguroso para evaluar la resiliencia de las viviendas autoconstruidas, sino que también integra aspectos importantes de ingeniería estructural y urbanística para mejorar la gestión del riesgo sísmico en estructuras residenciales en Lima

#### ***4.1.1. Caracterización de los edificios autoconstruidos – viviendas.***

La caracterización de todos los tipos de vivienda autoconstruidas (dado las múltiples tipologías según su ubicación y distrito), de la zona de estudio, que influyen en la vulnerabilidad sísmica son: el procesos constructivo, calidad de los materiales, resistencia en el comportamiento de los muros, densidad de muros, participación de profesiones en las etapas de proyecto y/o ejecución, etapas de construcción, regularidad en planta, en altura, junta sísmica y otros aspectos, para caracterizar adecuadamente se utilizó una ficha de encuesta que recoja toda la información necesaria para el estudio. La figura 29 muestra fotografías de algunos tipos más comunes de viviendas en la zona de estudio.

### Figura 29

*Viviendas típicas en los distritos de Los Olivos, San Juan de Lurigancho, Pueblo Libre y Breña.*



Fuente: Elaboración propia.

#### a) Antigüedad de las viviendas

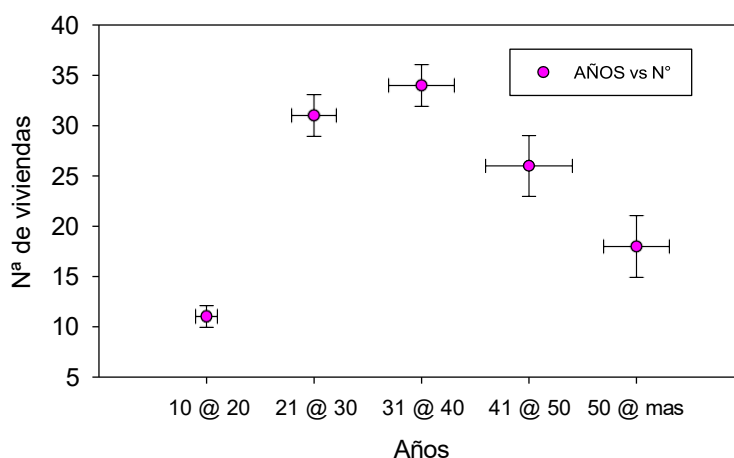
La figura 30, representa un gráfico de dispersión que correlaciona la cantidad de viviendas autoconstruidas con su antigüedad en años. Los puntos en el gráfico muestran el número de viviendas agrupadas en intervalos de 10 años, destacados por el número de años en el eje horizontal (10, 20, 30, 40, 50, y más de 50 años). El eje vertical indica el número de viviendas en cada grupo de edad.

Los datos presentan barras de error, que sugieren la variabilidad o el rango de error en el conteo de viviendas para cada grupo de edad. Aquí están algunas observaciones basadas en el gráfico:

- ✓ **Viviendas más antiguas:** Hay un pico notable en el número de viviendas en el grupo de 30 a 40 años, indicando que una gran cantidad de viviendas fueron construidas durante ese período. Este grupo de edad tiene el mayor número de viviendas con aproximadamente 35 casas.
- ✓ **Disminución en construcciones nuevas:** A partir de los 40 años, hay una disminución en el número de viviendas, con un ligero aumento en el grupo de más de 50 años. Esto podría sugerir que hubo menos construcción de nuevas viviendas después de este período, o que las viviendas más antiguas han sido reemplazadas o dejaron de ser habitadas.
- ✓ **Menos viviendas recientes y muy antiguas:** Las viviendas más nuevas (10 años) y muy antiguas (más de 50 años) tienen cantidades similares, lo que sugiere una disminución en la construcción de viviendas nuevas y una persistencia de viviendas muy antiguas.

**Figura 30**

*Antigüedad de las viviendas.*



Fuente: Elaboración propia.

Este tipo de análisis ayuda a comprender la evolución temporal de la construcción de viviendas en la región estudiada, lo que puede influir para el análisis de la vulnerabilidad y resiliencia sísmica, especialmente considerando la resistencia de las estructuras a los desastres naturales como los sismos.

#### **b) Participación de dirección técnica**

Las tablas proporcionadas ofrecen un análisis comparativo de la supervisión técnica en las etapas de proyecto y ejecución para edificios de diferentes alturas (2 pisos, 4 pisos, y 6 pisos).

**Etapas del Proyecto:** Para edificios de 2 pisos (2P), el 67% se realizó con dirección técnica (P-DT) y el 33% sin dirección técnica (P-SDT). En edificios de 4 pisos (4P), el 81% contó con dirección técnica, lo que indica un mayor cumplimiento de normativas probablemente por los mayores requisitos estructurales y de diseño en estructuras más altas. Solo el 19% se realizó sin dirección técnica. Para los edificios de 6 pisos (6P), el 73% se realizó con dirección técnica y el 27% sin ella, mostrando una tendencia similar a los edificios de 2 pisos, pero con una mayor proporción de supervisión técnica comparado con estos.

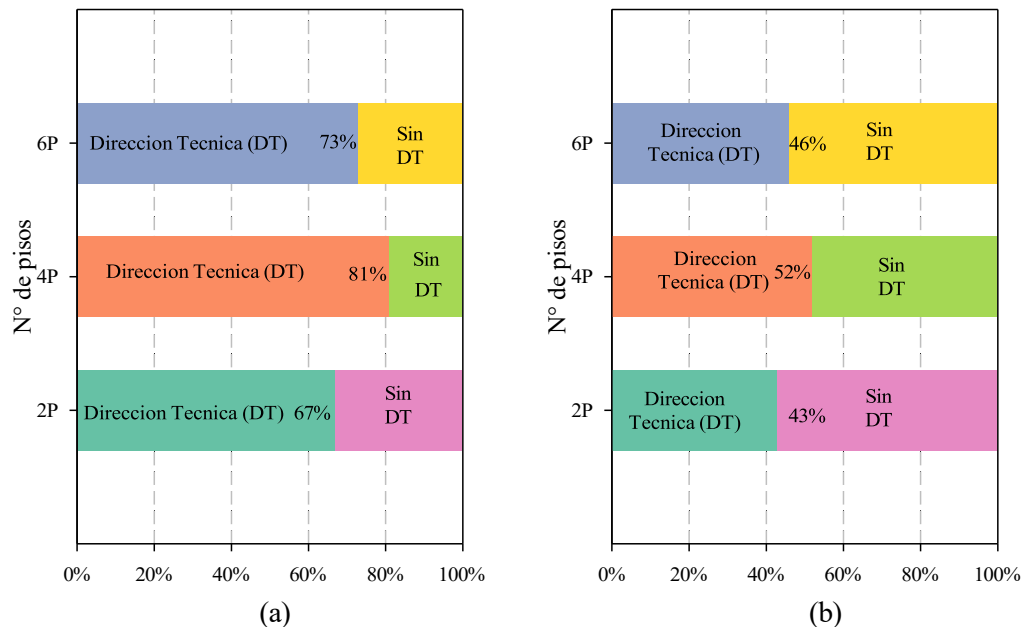
**Etapas de Ejecución:** Aquí, los datos no están segregados por altura del edificio, pero proporcionan una visión general de la supervisión durante la construcción. El 43% de las ejecuciones se realizó con dirección técnica (E-DT) y el 57% sin dirección técnica (E-SDT), indicando una menor supervisión durante la fase de construcción en comparación con la fase de diseño. Para el segundo grupo de datos, se observa que el 52% de las ejecuciones tuvo dirección técnica y el 48% no, mientras que, para el último grupo, el 46% contó con dirección técnica y el 54% no.

#### **Interpretación:**

- ✓ Etapa del Proyecto: La presencia de una mayor dirección técnica en las fases de proyecto para edificios más altos refleja la complejidad y los requisitos reglamentarios más estrictos que estos conllevan. La dirección técnica en esta etapa puede estar motivada por la necesidad de cumplir con los estándares de construcción y obtener las licencias requeridas.
- ✓ Etapa de Ejecución: La reducción en la supervisión técnica durante la construcción sugiere posibles desviaciones entre el diseño planeado y su implementación. Esto puede deberse a limitaciones presupuestarias, lapsos en la supervisión, o la aplicación inconsistente de estándares de construcción.

**Figura 31**

*Con dirección técnica y sin dirección técnica, a) etapa de proyecto, y b) etapa de ejecución.*



Fuente: Elaboración propia.

En resumen, estos datos revelan la importancia crítica de la supervisión técnica en todas las etapas de la construcción, especialmente en edificaciones de mayor altura, para garantizar la seguridad estructural y el cumplimiento de los códigos de construcción.

### c) Número de pisos de las viviendas predominantes concluidos

La figura 32, presenta una distribución del porcentaje de viviendas autoconstruidas según el número de pisos y el rango de porcentaje asociado a cada uno, basada en una evaluación de 120 viviendas. Aquí está el desglose:

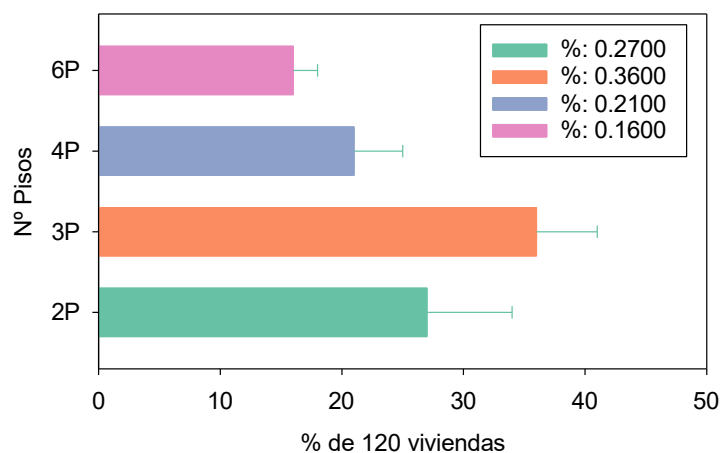
- ✓ **2 pisos (2P):** Una gran mayoría de viviendas autoconstruidas tienen dos pisos, como lo indica la barra más larga, que representa un porcentaje significativo del total, en el rango del 36%. Hay una distribución de este porcentaje en cuatro rangos adicionales, siendo el más significativo el que representa el 21% de las viviendas.
- ✓ **3 pisos (3P):** Las viviendas de tres pisos representan un porcentaje menor en comparación con las de dos pisos. La barra más larga indica un porcentaje significativo pero menor que el de las viviendas de dos pisos, en el rango del 36%.
- ✓ **4 pisos (4P):** Las viviendas de cuatro pisos tienen una distribución aún menor, con una barra principal que indica un porcentaje en el rango del 16%.
- ✓ **6 pisos (6P):** Las viviendas de seis pisos son las menos comunes en la muestra. La barra más larga para este grupo está en el rango del 27%, que es sustancial, pero representa un pequeño número en comparación con el resto.

Las barras de error en cada barra podrían representar la variabilidad o incertidumbre en el porcentaje de viviendas por número de pisos. Sin embargo, las barras de error son relativamente pequeñas, lo que sugiere que la estimación del porcentaje para cada grupo de altura de pisos es bastante precisa.

La figura 33, ilustra cómo la mayoría de las viviendas autoconstruidas evaluadas tienen dos o tres pisos, con una disminución gradual en el número de viviendas a medida que aumenta el número de pisos. Esto podría reflejar limitaciones económicas o regulaciones de planificación urbana que afectan la autoconstrucción.

### Figura 32

*Antigüedad de las viviendas.*



Fuente: Elaboración propia.

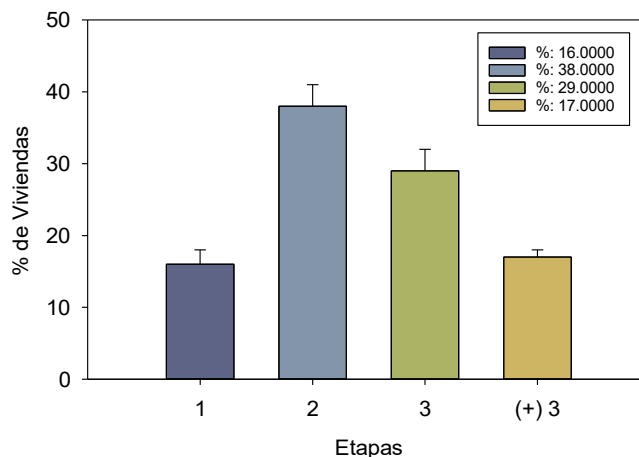
#### d) Etapas de construcción de las viviendas

La figura 33, muestra la distribución porcentual de viviendas autoconstruidas según las etapas de construcción que tuvieron para su culminación, basada en una evaluación de 120 viviendas. Asimismo, la gráfica representa el proceso de construcción de 120 viviendas autoconstruidas de 2, 4 y 6 niveles, mostrando las etapas de construcción completadas para cada grupo. Se detalla cómo estas viviendas fueron finalizadas en diferentes etapas, reflejando las variaciones en el proceso constructivo que pueden estar influenciadas por diversos factores, incluyendo económicos y de disponibilidad de materiales. Aquí la descripción detallada según la figura:

- ✓ **Una sola etapa (16%):** Este porcentaje de viviendas fue completado en una sola etapa de construcción. Este grupo podría representar a los propietarios que contaban con los recursos necesarios para completar la construcción sin interrupciones, o que optaron por un diseño más simple que permitiera una construcción rápida y directa.
- ✓ **Dos etapas (38%):** La mayoría de las viviendas se construyeron en dos etapas, lo que puede reflejar la influencia de factores económicos como la disponibilidad fluctuante de fondos, lo que obligó a los propietarios a pausar y reanudar el trabajo. Esta segmentación en la construcción también puede estar relacionada con variaciones en la disponibilidad o precios de los materiales a lo largo del tiempo, o necesidades de adaptación a cambios en el diseño inicial.
- ✓ **Tres etapas (29%):** Un porcentaje considerable completó su construcción en tres etapas. Este patrón sugiere que factores adicionales, posiblemente incluyendo permisos de construcción, cambios en la planificación urbana o modificaciones en el diseño original por necesidades emergentes (como el crecimiento familiar), jugaron un rol en prolongar la construcción.
- ✓ **Más de tres etapas (17%):** Este grupo incluye viviendas que necesitaron más de tres etapas para su finalización, indicativo de procesos de construcción largos y posiblemente complicados, afectados por múltiples factores externos como problemas legales, desafíos técnicos o interrupciones significativas por cuestiones económicas.

**Figura 33**

*Etapas de construcción de las viviendas autoconstruidas (encuestados solo viviendas concluidas).*



Fuente: Elaboración propia.

Cada etapa reflejada en la gráfica subraya la complejidad y los desafíos inherentes a la autoconstrucción, especialmente en contextos donde los recursos son limitados y la planificación a largo plazo es desafiante. Las barras de error presentes en la gráfica también destacan la variabilidad y la incertidumbre en estas estimaciones, lo cual es crucial para entender las dinámicas de construcción y planificación en contextos de autoconstrucción.

#### **e) Resistencia del concreto $F'c$ (kg/cm<sup>2</sup>)**

La figura 34, muestra la resistencia a la compresión del concreto de columnas, vigas y losas en 120 viviendas autoconstruidas, evaluadas mediante el uso de un esclerómetro. Según la norma peruana E30, la resistencia mínima del concreto a la compresión debería ser de 210 kg/cm<sup>2</sup>, un estándar que no se cumple en ninguno de los elementos estructurales analizados.

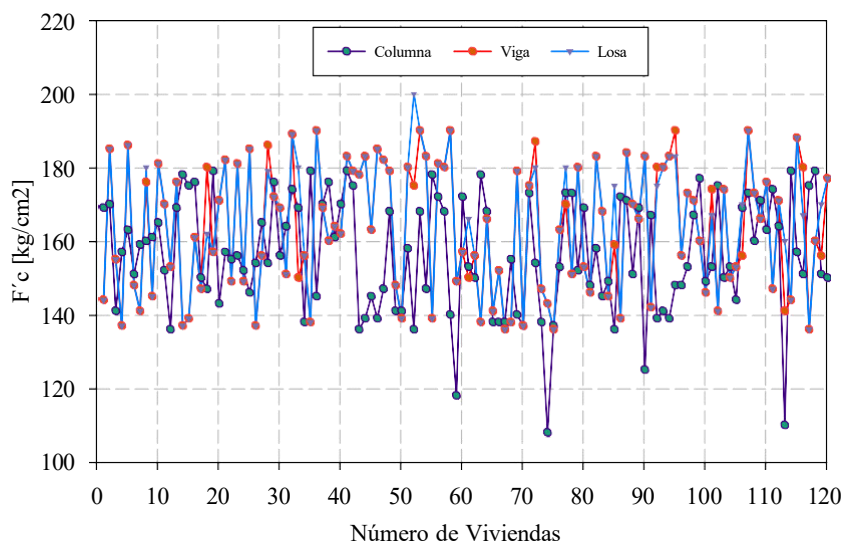
- ✓ **Resistencia del concreto: Columnas (negro):** Oscilan entre 130 y 180 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual está significativamente por debajo del mínimo requerido por la norma, lo que sugiere un riesgo estructural considerable. **Vigas (rojo) y Losas (azul):** Ambos componentes

también muestran resistencias inferiores a lo normado. La discrepancia en los resultados entre vigas y losas, a pesar de ser idealmente construidas en una sola etapa, sugiere que, en práctica, esto no siempre ocurre.

- ✓ **Variabilidad en la construcción:** La diferencia en los resultados de resistencia para vigas y losas podría atribuirse a la construcción en etapas diferenciadas, influenciada por restricciones económicas o falta de conocimiento técnico sobre los procesos constructivos. Esto puede llevar a variaciones en la mezcla de concreto, tiempos de curado y calidad del concreto utilizado.
- ✓ **Implicaciones para la seguridad estructural:** La uniformidad en la resistencia del concreto es crucial para la integridad estructural, especialmente en áreas propensas a sismos. La falta de cumplimiento de las normas puede incrementar significativamente el riesgo de colapso o daño grave durante un evento sísmico.

**Figura 34**

*Resistencia a la compresión de viviendas autoconstruidas (para este caso se involucraron viviendas donde sus elementos estructurales aún se encontraron expuestas)*



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, esta evaluación destaca la necesidad crítica de mejorar las prácticas de construcción y cumplimiento normativo en viviendas autoconstruidas para asegurar su resiliencia y seguridad estructural.

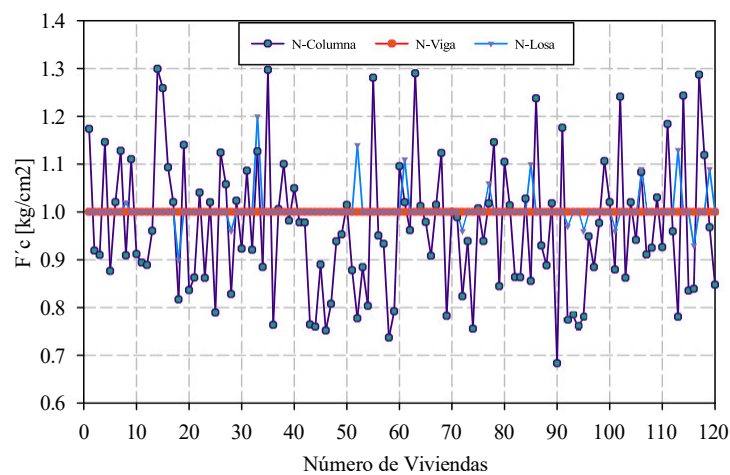
Las figuras 35, a, b y c. presentan la distribución de la resistencia a la compresión del concreto en columnas, vigas y losas de 120 viviendas autoconstruidas evaluadas mediante el uso de un esclerómetro. La norma peruana E30 especifica que la resistencia del concreto a la compresión debe ser de al menos  $210 \text{ kg/cm}^2$ , un estándar que, como muestran los gráficos, no se alcanza en ninguno de los elementos evaluados. **Figura 35 (a) de Puntos y Líneas:** Esta figura muestra la variabilidad individual de la resistencia del concreto en cada vivienda para los tres elementos estructurales. Los puntos representan las mediciones individuales, destacando la consistencia en la variabilidad y los patrones de comportamiento del concreto en columnas, vigas y losas. **Figura 36 (b) de Caja (Boxplot):** Esta representa la distribución y dispersión de los datos de resistencia a la compresión en cada tipo de elemento estructural de manera consolidada. Las medianas (líneas dentro de las cajas) proporcionan un resumen visual del valor central de las mediciones. Las cajas muestran el rango intercuartil, y las líneas extendidas (bigotes) indican la variabilidad fuera de los cuartiles superior e inferior. No se observan valores atípicos significativos que estén fuera del rango normal de los datos. **Figura 36 (c) de Violín:** Combina los elementos de una gráfica de caja con una estimación de densidad. Este tipo de gráfico es útil para visualizar la densidad de probabilidad de los datos en diferentes puntos, así como para comparar la distribución de la resistencia en los tres tipos de elementos estructurales. Los violines más anchos indican una mayor concentración de datos en esos valores de resistencia.

- ✓ **Distribución de la Resistencia a la Compresión: Columnas:** Las mediciones varían entre aproximadamente  $110$  y  $190 \text{ kg/cm}^2$ , con una mayoría de los valores concentrados en torno a los  $150 \text{ kg/cm}^2$ . Esto sugiere una calidad de concreto bastante uniforme entre

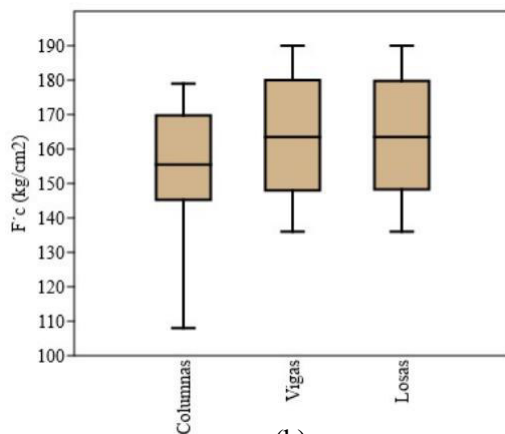
las columnas evaluadas, aunque con una resistencia significativamente inferior a la normativa E30 de 210 kg/cm<sup>2</sup>. **Vigas:** La resistencia en las vigas muestra una variación similar a las columnas, pero con ciertas mediciones alcanzando o superando ligeramente los 180 kg/cm<sup>2</sup>. Aun así, la mayoría de las vigas también están por debajo del estándar requerido. **Losas:** Las losas tienen una distribución de resistencia comparable a la de las vigas, indicando que los materiales y métodos de construcción para vigas y losas pueden ser similares. Sin embargo, al igual que en los otros componentes, las losas no cumplen con los requisitos de resistencia mínima.

**Figura 35**

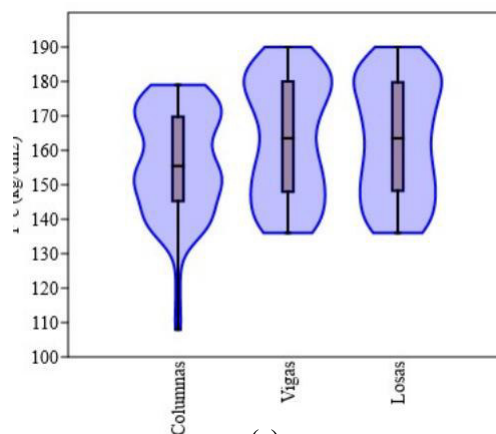
*Resistencia a la compresión del concreto. a) Variabilidad normalizado*



(a)



(b)



(c)

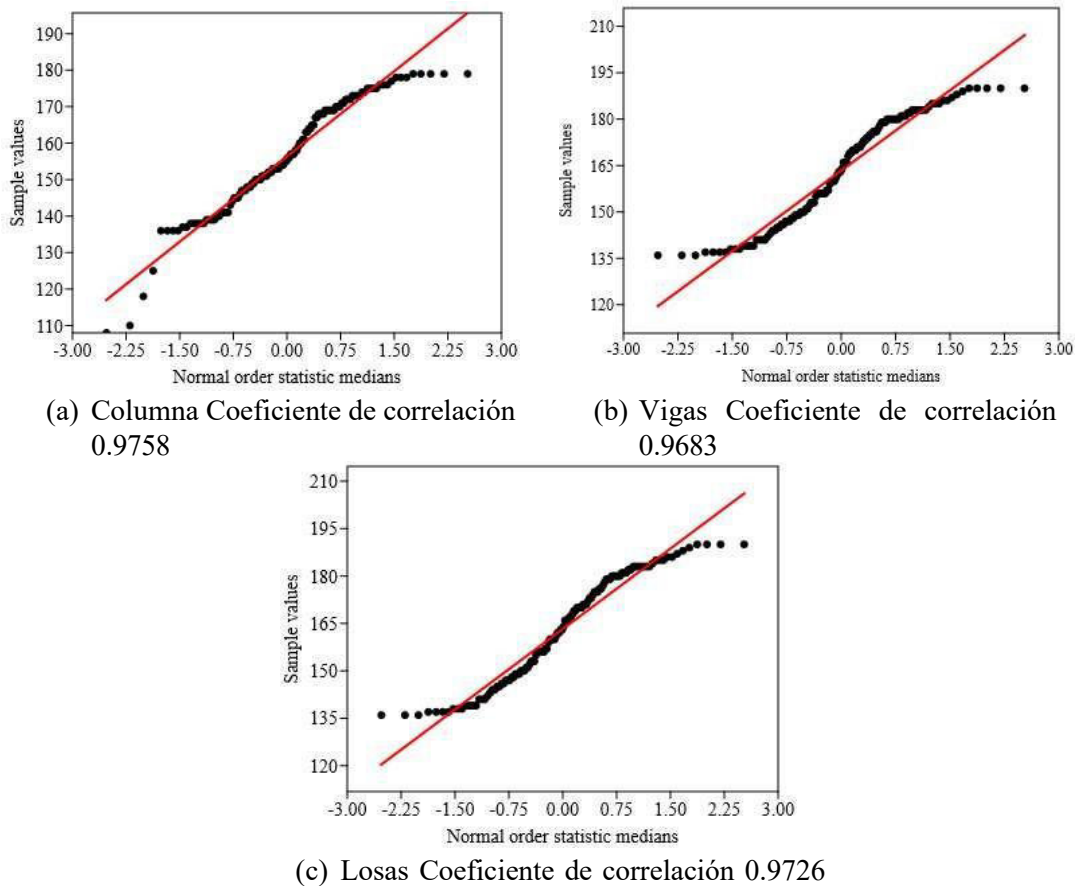
Fuente: Elaboración propia.

- ✓ **Consistencia y Variabilidad:** La resistencia en vigas y losas no siempre coincide, lo que puede deberse a diferencias en el momento de la construcción o en las proporciones de la mezcla del concreto. En algunos casos, esto puede reflejar una ejecución en etapas distintas, influenciada por limitaciones económicas o falta de supervisión técnica adecuada.
- ✓ **Norma Peruana E30:** Ningún elemento estructural evaluado cumple consistentemente con el estándar de resistencia a la compresión de 210 kg/cm<sup>2</sup> como mínimo. Esto representa una preocupación crítica respecto a la seguridad estructural y la resiliencia sísmica de estas viviendas, especialmente en una región propensa a terremotos.
- ✓ **Implicaciones para la Resiliencia Sísmica:** La deficiencia en la resistencia del concreto es alarmante dado que compromete la capacidad de los edificios para soportar cargas sísmicas. Esto podría resultar en daños estructurales severos o colapsos durante un sismo, poniendo en riesgo vidas humanas y aumentando la vulnerabilidad de estas comunidades.

En resumen, la evaluación de la resistencia a la compresión del concreto revela una carencia generalizada en cumplir con las normas de construcción necesarias para garantizar la seguridad estructural. Esta situación demanda una acción inmediata para reforzar las prácticas de construcción y supervisión en las áreas de autoconstrucción, para proteger a las comunidades contra los riesgos de desastres naturales como terremotos.

**Figura 36**

*Probabilidad normal que evalúan la distribución de la resistencia a la compresión del concreto en columnas, vigas y losas.*



Fuente: Elaboración propia.

La figura 36 a, b y c. analizadas presentan gráficos de probabilidad normal que evalúan la distribución de la resistencia a la compresión del concreto en columnas, vigas y losas de viviendas autoconstruidas. Los datos mostrados revelan que, aunque la resistencia del concreto en estos elementos estructurales sigue una distribución relativamente normal, la calidad del concreto es consistentemente inferior a los 210 kg/cm<sup>2</sup> requeridos por la norma peruana E30. Esto sugiere deficiencias significativas en los materiales de construcción o en las prácticas constructivas empleadas. El coeficiente de correlación para columnas es de 0.9758, para vigas de 0.9683 y para losas de 0.9726, indicando en todos los casos una alta correlación con una distribución normal, pero con variaciones que podrían reflejar diferencias en las mezclas de

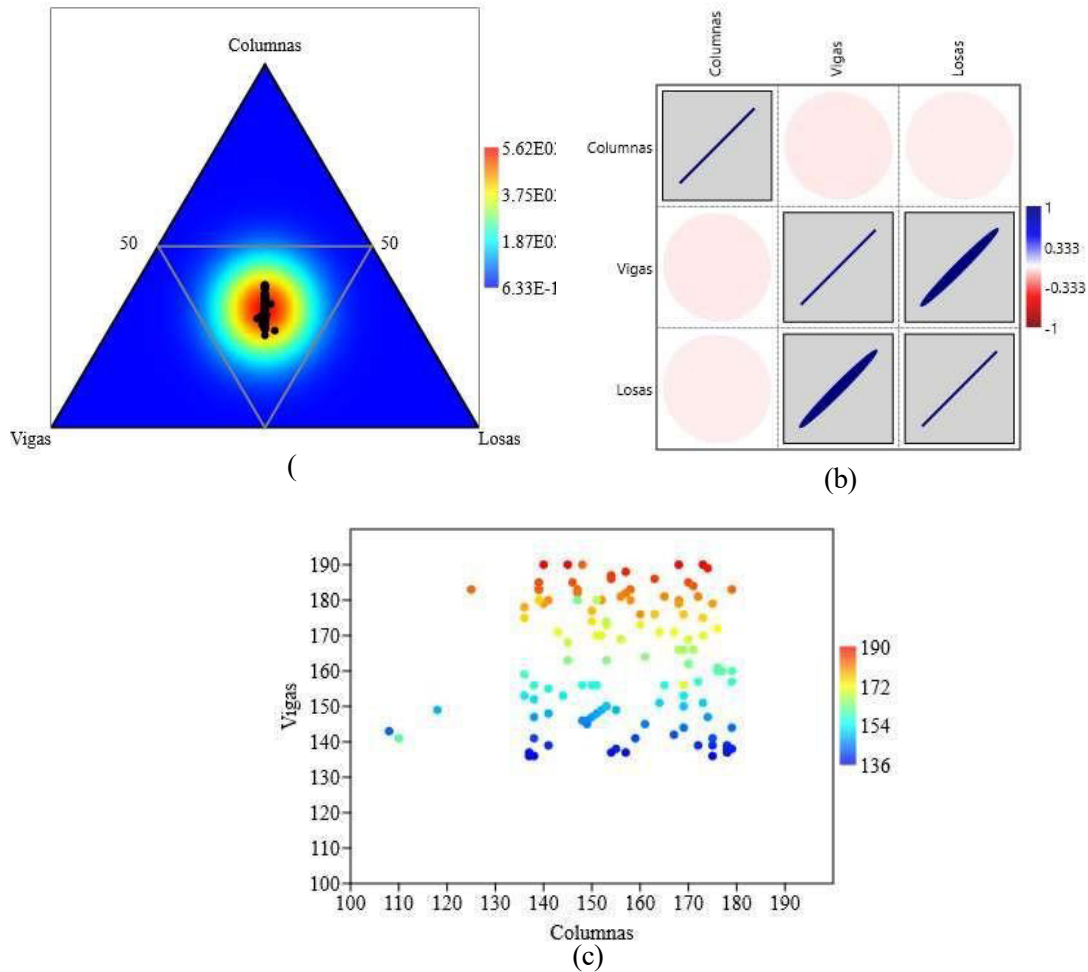
concreto o en el proceso de curado y construcción. Además, se observó que las vigas y losas no siempre muestran consistencia en sus valores de resistencia, lo que puede deberse a la ejecución de las estructuras en diferentes etapas, posiblemente debido a limitaciones económicas o falta de conocimientos técnicos. Esta variabilidad y la baja calidad general del concreto resaltan la urgencia de mejorar la supervisión técnica y el control de calidad durante la autoconstrucción para garantizar la seguridad estructural, especialmente en una región propensa a sismos como Perú. La investigación subraya la necesidad crítica de adherirse a estándares de construcción para mejorar la resistencia sísmica de las viviendas autoconstruidas, protegiendo así la vida y bienestar de sus ocupantes.

La figura 37, muestran diferentes análisis estadísticos y visuales de la resistencia a la compresión del concreto en columnas, vigas y losas en viviendas autoconstruidas. Aquí hay una interpretación detallada de cada figura:

- **Figura 37 (a) (Ternario):** Este gráfico ternario muestra la distribución relativa de la resistencia a la compresión del concreto entre columnas, vigas y losas. El punto central de color más intenso indica que la mayor densidad de los datos se concentra en una resistencia promedio similar entre estos tres elementos estructurales, lo cual implica que, en términos de resistencia a la compresión, hay una homogeneidad relativa entre los elementos analizados en las viviendas evaluadas.

**Figura 37**

*Probabilidad normal que evalúan la distribución de la resistencia a la compresión del concreto en columnas, vigas y losas.*



Fuente: Elaboración propia.

- **Figura 37 (b) (Matriz de Correlación):** Este gráfico utiliza círculos de correlación para representar la relación entre las resistencias de columnas, vigas y losas. Los círculos grandes y de color rosado cerca de 1 en las diagonales entre vigas y losas, así como entre columnas y losas, indican una alta correlación positiva, lo que significa que estas estructuras tienden a tener resistencias comparables. Los círculos más pequeños o ausentes en otros campos sugieren una correlación más débil o no significativa.

- **Figura 37 (c) (Dispersión):** Este gráfico de dispersión colorea los puntos según la resistencia a la compresión del concreto en las vigas, con relación a las columnas. La variación de colores desde azul hasta rojo indica diferentes rangos de resistencia, mostrando una tendencia de que, en general, la resistencia en las vigas puede variar significativamente incluso cuando las columnas tienen resistencias similares. Esto podría reflejar variaciones en la calidad de la construcción o en los materiales usados entre diferentes partes de la estructura.

Estas figuras son útiles para visualizar las diferencias y similitudes en la resistencia del concreto dentro de las estructuras evaluadas, y cómo estas pueden afectar la interpretación general de la resistencia estructural en viviendas autoconstruidas. La consistencia en los datos de resistencia entre diferentes elementos estructurales es crucial para la integridad general de las construcciones frente a sismos y otros factores de estrés.

**Tabla 23**

*Índice de correlación entre elementos estructurales*

	Columnas	Vigas	Losas
Columnas		-0.042435	-0.03647
Vigas	-0.042435		0.98399
Losas	-0.03647	0.98399	

Fuente: Elaboración propia

El análisis estadístico (figura 38 a y b) de la evaluación de la consistencia entre evaluadores y la variabilidad de las mediciones dentro de un conjunto de datos. Aquí está la interpretación detallada de cada elemento:

- **Tabla ANOVA: Suma de Cuadrados (Sum of sqrs):** Divide la variación total en componentes atribuibles a diferentes fuentes. Aquí, la variación entre casos es mayor que la variación entre evaluadores, lo que indica una variabilidad considerable en las mediciones entre los casos estudiados. **Grados de libertad**

**(df) y Cuadrado medio (Mean square):** Estos valores se usan para calcular el estadístico F, que es significativo en este análisis ( $F = 10.9$ ), indicando que las diferencias entre los grupos son estadísticamente significativas. **F:** El valor de F sugiere que hay diferencias significativas en las mediciones entre los evaluadores, justificando un análisis más profundo de la consistencia interevaluador.

- **Modelos de Correlación Intraclase (ICC):** Los modelos ICC varían en configuración, ajustándose por efectos aleatorios y fijos para evaluar la consistencia entre evaluadores para mediciones individuales y promedios. **ICC(1,1)** y **ICC(2,1)** muestran consistencia baja para evaluaciones individuales, lo cual es preocupante para la confiabilidad de las mediciones. **ICC(1,k)** y **ICC(2,k)**, que evalúan la fiabilidad de las medias, muestran mayor consistencia, especialmente el **ICC(2,k)** con un valor de 0.5936, indicando que promedios de múltiples evaluaciones son más confiables. **ICC(3,1)** y **ICC(3,k)** también reflejan consistencias moderadas, sugerentes de mayor fiabilidad cuando se consideran medias de múltiples evaluaciones.
- **Estadísticas de Chi-cuadrado:** El valor de **Chi-cuadrado** de 264.4 con un valor p de 0.11544 sugiere que no hay una asociación estadísticamente significativa entre las categorías analizadas, lo que puede indicar que no hay patrones consistentes en la variabilidad de datos a través de los grupos. **Cramer's V** y **Contingency C:** Valores muy bajos indican que cualquier asociación presente es débil, lo cual es consistente con el valor p no significativo de la prueba chi-cuadrado.

La variabilidad dentro de las mediciones entre diferentes evaluadores sugiere desafíos en la consistencia y fiabilidad de las mediciones realizadas. Los modelos ICC muestran que la

evaluación de las medias proporciona una mejor consistencia que las evaluaciones individuales. Además, el análisis chi-cuadrado sugiere una falta de asociación significativa entre las categorías, indicando que no hay un patrón claro de dependencia entre las variables categorizadas en el estudio. Esto refleja la necesidad de métodos de medición más robustos o formación adicional para los evaluadores para mejorar la consistencia en futuras evaluaciones.

**Figura 38**

*probabilidad normal que evalúan la distribución de la resistencia a la compresión del concreto en columnas, vigas y losas.*

ANOVA table				
	Sum of sqrs	df	Mean square	F
<b>Between raters:</b>	3851.02	2	1925.51	10.9
<b>Between cases:</b>	54250.6	119	455.887	2.581
<b>Within cases:</b>	45889.3	240	191.206	
<b>Residual:</b>	42038.3	238	176.632	
<b>Total:</b>	100140	359		

95% confidence				
<b>Model 1</b>	<b>Individual</b>	<b>ICC(1,1)</b>	0.3157	[0.2021, 0.4323]
	<b>Mean</b>	<b>ICC(1,k)</b>	0.5806	[0.4318, 0.6955]
<b>Model 2</b>	<b>Individual</b>	<b>ICC(2,1)</b>	0.3274	[0.2132, 0.4437]
	<b>Mean</b>	<b>ICC(2,k)</b>	0.5936	[0.4484, 0.7052]
<b>Model 3</b>	<b>Individual</b>	<b>ICC(3,1)</b>	0.3451	[0.2316, 0.4601]
	<b>Mean</b>	<b>ICC(3,k)</b>	0.6126	[0.4748, 0.7188]

(a)

Chi squared			
<b>Rows, columns:</b>	120, 3	<b>Degrees freedom:</b>	238
<b>Chi2:</b>	264.4	<b>p (no assoc.):</b>	0.11544
<b>Monte Carlo p:</b>	-1		

---

Fisher's exact	
Not available	

---

Other statistics			
<b>Cramer's V:</b>	0.047761	<b>Contingency C:</b>	0.06739

(b)

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 24**

*Estadística de la resistencia a la compresión del concreto en columnas, vigas y losas*

	<b>Columnas</b>	<b>Vigas</b>	<b>Losas</b>
<b>N</b>	120	120	120
<b>Min</b>	108	136	136
<b>Max</b>	179	190	190
<b>Sum</b>	18763	19602	19589
<b>Mean</b>	156.3583	163.35	163.2417
<b>Std. error</b>	1.402618	1.562007	1.528304
<b>Variance</b>	236.0806	292.784	280.2856
<b>Stand. dev</b>	15.36491	17.11093	16.74173
<b>Median</b>	155.5	163.5	163.5
<b>25 prentil</b>	145.25	148	148.25
<b>75 prentil</b>	169.75	180	179.75
<b>Skewness</b>	-0.508063	-0.07905503	-0.08343579
<b>Kurtosis</b>	0.0769747	-1.386156	-1.32213
<b>Geom. mean</b>	155.5742	162.4509	162.3801
<b>Coeff. var</b>	9.826732	10.47501	10.2558

Fuente: Elaboración propia

La tabla resume las estadísticas descriptivas para la resistencia a la compresión del concreto (medida en  $\text{kg/cm}^2$ ) de columnas, vigas y losas de 120 viviendas autoconstruidas evaluadas.

### **Análisis Detallado**

- ✓ **Cantidad de muestras (N):** Cada estructura tiene 120 mediciones, asegurando consistencia en la cantidad de datos recogidos para columnas, vigas y losas.
- ✓ **Rango (Min-Max):**
  - **Columnas:** Varían de 108 a 179  $\text{kg/cm}^2$ .
  - **Vigas:** Varían de 136 a 190  $\text{kg/cm}^2$ .
  - **Losas:** Varían de 136 a 190  $\text{kg/cm}^2$ .

- Esto muestra que las vigas y las losas tienen valores mínimos más altos y máximos similares, lo que puede indicar una mejor calidad o consistencia en el concreto utilizado para estas estructuras comparado con las columnas.

✓ **Promedio (Mean):**

- El concreto en las vigas y losas tiene un valor medio similar (aprox. 163 kg/cm<sup>2</sup>), mayor que el de las columnas (156 kg/cm<sup>2</sup>). Esto podría indicar una consistencia en la mezcla de concreto utilizada para vigas y losas que es diferente o de mejor calidad que la de las columnas.

✓ **Desviación Estándar (Stand. dev):**

- Las vigas presentan la mayor variabilidad (17.11 kg/cm<sup>2</sup>) en resistencia a la compresión, seguidas de las losas (16.74 kg/cm<sup>2</sup>) y las columnas (15.36 kg/cm<sup>2</sup>). Esto sugiere más inconsistencia en las mezclas de concreto o en los procesos de curado para vigas.

✓ **Skewness:**

- Todos los elementos muestran una ligera asimetría negativa, indicando una distribución que se inclina ligeramente hacia valores más bajos que el promedio.

✓ **Kurtosis:**

- Las vigas y las losas tienen una kurtosis negativa, indicando una distribución más aplanada en comparación con una distribución normal, lo que sugiere mayor dispersión en los datos.
- Las columnas tienen una kurtosis cercana a cero, sugiriendo una distribución más normal.

✓ **Media Geométrica (Geom. mean) y Coeficiente de Variación (Coeff. var):**

- Las medias geométricas son consistentes con las medias aritméticas, reafirmando la centralidad de los datos.
- Los coeficientes de variación son menores al 11% para todos los elementos, indicando un grado razonable de homogeneidad en la resistencia del concreto, aunque ligeramente más variable en las vigas.

Los resultados indican que, aunque hay una consistencia aceptable en las propiedades del concreto entre las diferentes estructuras, existen variaciones que podrían influir en la integridad estructural general de las viviendas. La mayor variabilidad en las vigas podría ser crítica, dado que las vigas suelen soportar cargas importantes y distribuirlas a otros elementos estructurales como las columnas y losas. Además, la calidad general del concreto sigue estando por debajo del estándar normativo recomendado ( $210 \text{ kg/cm}^2$ ), lo que es una preocupación significativa para la seguridad estructural en caso de sismos. Esto refleja la necesidad de mejorar las prácticas de construcción y asegurar la calidad del material en las construcciones autoconstruidas para aumentar la resiliencia sísmica.

La figura 39, resume las patologías encontradas en 120 viviendas autoconstruidas, evaluadas en términos de diversos defectos estructurales y de construcción. Estas patologías son críticas, ya que cada una afecta directamente la integridad estructural y la seguridad sísmica de las viviendas. A continuación, se ofrece una interpretación de las principales observaciones:

- ✓ **Exposición de aceros (81.25%):** Es la patología más frecuente. La alta prevalencia indica una seria deficiencia en la protección y mantenimiento del acero estructural, exponiéndolo a la corrosión y debilitando la estructura, especialmente crítico en zonas sísmicas.
- ✓ **Construcción en múltiples etapas:** Observado tanto en columnas (33.12%) como en muros (25.15%). Esto sugiere que las construcciones se realizaron en diferentes

tiempos, lo que puede llevar a inconsistencias en la calidad y características del material utilizado, afectando la uniformidad y resistencia estructural.

- ✓ **Mala interacción entre columnas y muros (37.23%) y entre ladrillos y mortero (61.23%):** Indica un problema con la cohesión de los materiales de construcción, lo que reduce la efectividad del confinamiento y la capacidad de las estructuras para actuar de manera monolítica durante un sismo.
- ✓ **Presencia de cangrejeras en el mortero (49.56%) y en elementos de confinamiento (vigas 48.94% y columnas 44.12%):** Refleja deficiencias en la mezcla o aplicación del mortero, lo que puede crear puntos débiles en la estructura.
- ✓ **Desprendimientos y eflorescencia:** Se observa un alto porcentaje de desprendimiento de partículas en morteros (55.23%) y ladrillos (62.13%), así como eflorescencia, que puede indicar problemas de humedad que afectan la durabilidad del material.
- ✓ **Mala calidad de la arena en el mortero (39.49%):** Podría comprometer la resistencia del mortero, afectando la capacidad de carga y la durabilidad de la estructura.
- ✓ **Deficiente alineación de ladrillos (vertical 49.7%, horizontal 51.24%):** Implica un riesgo aumentado bajo cargas sísmicas, ya que una alineación pobre puede impedir que la estructura soporte adecuadamente las fuerzas laterales.
- ✓ **Grietas en las estructuras (diagonales 2.15%, verticales 33.47%):** Las grietas, especialmente las verticales, son indicativas de tensiones estructurales que ya han afectado la integridad de la edificación, lo que es preocupante desde la perspectiva de la seguridad sísmica.
- ✓ **Salinidad en cimientos (64.12%) y juntas de mortero no uniformes (64.15%):** Estos problemas pueden comprometer la adherencia y la capacidad de carga de las estructuras, reduciendo su capacidad para soportar sismos.

- ✓ **Muros sin adecuado confinamiento (56.15%) y sin viga solera (64.12%):** La falta de elementos estructurales adecuados para el confinamiento puede llevar a un colapso catastrófico bajo carga sísmica, ya que los muros son incapaces de soportar tensiones horizontales efectivamente.

**Figura 39**

*Patología en viviendas autoconstruidas.*



Fuente: Elaboración propia.

Estas patologías destacan la necesidad de medidas correctivas en la construcción y mantenimiento de viviendas autoconstruidas para mejorar su seguridad sísmica. La

rehabilitación estructural y la educación en técnicas de construcción adecuadas son cruciales para mitigar los riesgos asociados con estas deficiencias.

#### **4.1.2. Determinación de los índices de Resiliencia sísmica.**

##### **a) Determinación de la vulnerabilidad**

Según la metodología de Benedetti-Petrini para evaluar la vulnerabilidad sísmica, el índice de vulnerabilidad de edificaciones de albañilería, típicamente observadas en construcciones autoconstruidas, se calcula mediante una suma ponderada. Este procedimiento cuantifica la "calidad sísmica" de distintos parámetros estructurales y no estructurales, basados en inspecciones técnicas detalladas.

Durante estas evaluaciones, a cada parámetro se le asigna una clasificación que va desde la A hasta la D, donde:

- ✓ Clasificación A: Representa la condición óptima y se le asigna un valor numérico de  $K_i=0$ , indicando ausencia de vulnerabilidad.
- ✓ Clasificación D: Indica la condición más desfavorable con un valor numérico de  $K_i=45$ , reflejando alta vulnerabilidad.

Esta metodología permite una evaluación precisa y diferenciada de las propiedades de las estructuras, fundamental para diseñar estrategias efectivas de mitigación y respuesta ante eventos sísmicos. Adicionalmente, la relevancia de cada parámetro en la evaluación se pondera mediante un coeficiente de peso " $W_i$ ", que oscila entre 0.25 y 1.5. Este coeficiente busca resaltar la importancia relativa de cada factor en la determinación del resultado final.

Para calcular el índice de vulnerabilidad " $I_v$ " de cada edificación, se utiliza la siguiente fórmula:

$$I_v = \sum K_i \times W_i$$

A partir de esta ecuación, se establece una escala de valores continuos que varían desde 0 hasta un máximo de 382.5, representando el nivel de vulnerabilidad más elevado. Los parámetros 1, 2, 4, 5, 9, 10 y 11 son cualitativos y se definen claramente a través de los criterios especificados en la metodología.

En contraste, los parámetros 3, 6, 7 y 8 son cuantitativos y requieren la aplicación de operaciones matemáticas básicas para su cálculo. Estos parámetros juegan un rol crucial en la evaluación precisa del índice de vulnerabilidad, al aportar una dimensión cuantificable a la evaluación de la resistencia sísmica de la estructura.

**Tabla 25**

*Escala de vulnerabilidad Benedetti-Petrini para edificaciones albañilería*

i	Parámetros	Clases Ki				Peso Wi
		KiA	KiB	KiC	KiD	
1	Organización del sistema resistente.	0	5	20	45	1
2	Calidad del sistema resistente.	0	5	25	45	0.25
3	Resistencia convencional.	0	5	25	45	1.5
4	Posición del edificio y cimentación.	0	5	25	45	0.75
5	Diafragmas horizontales.	0	5	15	45	1
6	Configuración en planta.	0	5	25	45	0.5
7	Configuración en elevación.	0	5	25	45	1
8	Distancia máxima entre los muros.	0	5	25	45	0.25
9	Tipo de cubierta.	0	15	25	45	1
10	Elementos no estructurales.	0	0	25	45	0.25
11	Estado de conservación.	0	5	25	45	1

Fuente: Adaptado de *Benedetti-Petrini*

**Tabla 26**

*Estos 11 parámetros de adaptaron para el caso de estudio, que se describe a continuación*

i	Parámetros	Componente propuesto por el RNE
1	Organización del sistema resistente	Asesoramiento técnico y criterios de estructuración en mampostería según la normativa del 97.
2	Calidad del sistema resistente	Calidad del material y del proceso constructivo conforme a las normativas E060 y E070.

3	Resistencia convencional	Factores sismorresistentes según las normativas E060 y E070.
4	Posición del edificio y cimentación	Condiciones geométricas del terreno, considerando tipos de suelo muy rígido, intermedio y flexible, conforme a la normativa E030.
5	Diafragmas horizontales	Consideraciones específicas para diafragmas según las normativas E030, E060 y E070.
6	Configuración en planta	Configuración estructural que contempla irregularidades en planta.
7	Configuración en elevación	Configuración estructural que contempla irregularidades en elevación.
8	Distancia máxima entre los muros	Densidad de los muros en las edificaciones.
9	Tipo de cubierta	Calidad en la conexión de la cubierta liviana con el sistema resistente.
10	Elementos no estructurales	Conexión adecuada de los elementos no estructurales.
11	Estado de conservación	Condición actual de la vivienda.

Fuente: Adaptado de *Benedetti-Petrini*

La tabla 25 presenta los resultados de una encuesta diseñada para evaluar la vulnerabilidad sísmica de 120 viviendas autoconstruidas, utilizando los siguientes parámetros, que están alineados con los componentes establecidos por el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE):

- 1) **Organización del sistema resistente:** Incluye la asesoría técnica y los criterios de estructuración en albañilería, según las recomendaciones establecidas en la normativa vigente de 2016, especialmente crucial en construcciones autogestionadas.
- 2) **Calidad del sistema resistente:** Evalúa la calidad de los materiales y del proceso constructivo, siguiendo las normativas E060 y E070, con especial atención a los desafíos que presentan los recursos limitados y la falta de supervisión técnica en las construcciones autoconstruidas.
- 3) **Resistencia convencional:** Considera los factores sismorresistentes de acuerdo con las normas E060 y E070, siendo de vital importancia en edificaciones que no siempre siguen procedimientos estandarizados.

- 4) **Posición del edificio y cimentación:** Analiza las condiciones geométricas del terreno, incluyendo el tipo de suelo, que puede ser muy rígido, intermedio o flexible, según la Norma E030, aspectos fundamentales en viviendas autoconstruidas donde la cimentación puede ser deficiente.
- 5) **Diafragmas horizontales:** Revisa las consideraciones para diafragmas conforme a las Normas E030, E060 y E070, elementos que pueden no estar adecuadamente implementados en construcciones sin supervisión técnica.
- 6) **Configuración en planta:** Examina la configuración estructural y las posibles irregularidades estructurales en planta, que son comunes en viviendas autoconstruidas debido a la falta de planificación formal.
- 7) **Configuración en elevación:** Similar al punto anterior, evalúa las irregularidades estructurales en la elevación de la estructura, lo que es crítico en edificaciones construidas sin control técnico.
- 8) **Distancia máxima entre los muros:** Mide la densidad de los muros en las edificaciones para asegurar una adecuada resistencia estructural, un aspecto frecuentemente subestimado en viviendas autoconstruidas.
- 9) **Tipo de cubierta:** Considera la calidad de la unión entre la cobertura liviana y el sistema resistente, lo cual puede ser un punto débil en construcciones autogestionadas.
- 10) **Elementos no estructurales:** Valora la conexión de los elementos no estructurales, que pueden comprometer la integridad de la edificación durante un sismo, particularmente en viviendas construidas sin asesoramiento técnico.
- 11) **Estado de conservación:** Determina la condición actual de la vivienda, lo que es crucial para valorar su capacidad de resistir sismos, siendo especialmente relevante en

edificaciones autoconstruidas que pueden presentar un mayor desgaste debido a la falta de mantenimiento adecuado.

Cada uno de estos parámetros es crucial para comprender y mejorar la resiliencia sísmica de las viviendas evaluadas, ayudando a identificar puntos críticos que requieren atención para minimizar los riesgos ante un sismo.

La tabla 27 muestra una evaluación detallada de la vulnerabilidad sísmica de 120 viviendas autoconstruidas, utilizando una metodología basada en el análisis de múltiples parámetros estructurales y no estructurales. Los parámetros, calificados de A a D (donde A es óptimo y D es el más desfavorable), junto con sus correspondientes pesos numéricos ( $K_i$ ), se suman para derivar un 'Índice de Vulnerabilidad' (Iv) para cada vivienda. Este índice se presenta tanto en valores absolutos como en porcentajes, reflejando la proporción del máximo riesgo posible de 382.5 que representa cada vivienda.

Los resultados de la tabla 27 se clasifican adicionalmente en términos de vulnerabilidad, peligro, riesgo e índice de resiliencia, que están directamente relacionados con el valor de Iv. Por ejemplo, una mayor puntuación en Iv indica una mayor vulnerabilidad y riesgo, lo cual está vinculado a una menor resiliencia sísmica. Estos resultados se dividen en categorías de 'Alta', 'Media' y 'Baja', que proporcionan una comprensión rápida del nivel de riesgo asociado con cada propiedad. En general, se observa que la mayoría de las viviendas tienen una vulnerabilidad media o alta, lo cual es indicativo de potenciales deficiencias en la construcción y/o en los materiales utilizados, así como en el diseño estructural de acuerdo a las normas sísmicas relevantes.

Tabla 27

Resultados del Iv por vivienda con porcentaje para asignación de vulnerabilidad, Peligro, Riesgo y índice de resiliencia.

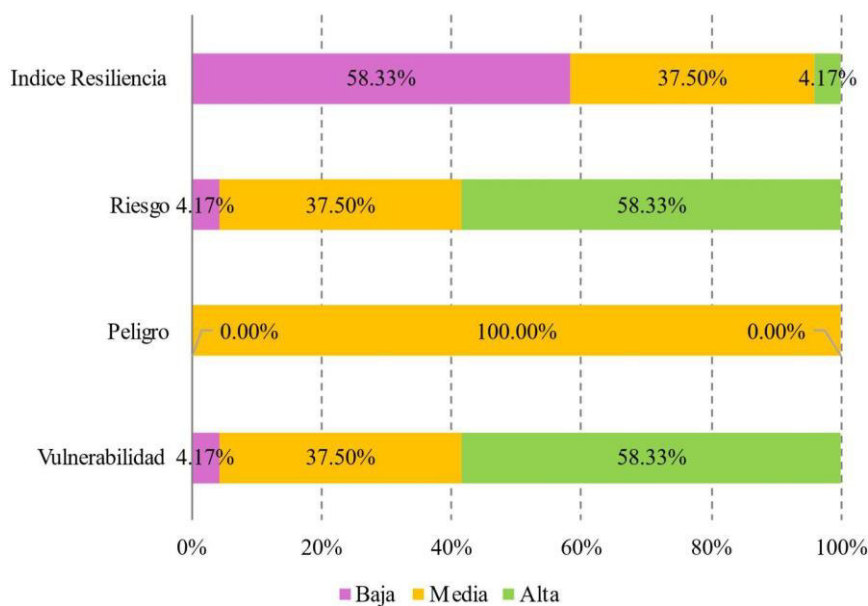
N°	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		Iv	Iv [%]	Vulnerabilidad	Peligro	Riesgo	Índice Resiliencia
	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki						
1	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	C	25	B	0	A	0	121.25	31.70%	Media	Medio	Media	Media
2	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	D	45	131.25	34.31%	Media	Medio	Media	Media
3	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	B	5	B	5	A	0	C	25	A	0	C	25	155.00	40.52%	Alta	Medio	Alta	Baja
4	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	C	25	C	25	B	0	C	25	153.75	40.20%	Alta	Medio	Alta	Baja
5	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	B	15	A	0	C	25	136.25	35.62%	Alta	Medio	Alta	Baja
6	D	45	D	45	B	5	D	45	D	45	C	25	B	5	B	5	A	0	D	45	A	0	250.00	65.36%	Alta	Medio	Alta	Baja
7	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	C	25	B	15	A	0	B	5	113.75	29.74%	Media	Medio	Media	Media
8	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	C	25	B	5	C	25	C	25	A	0	C	25	171.25	44.77%	Alta	Medio	Alta	Baja
9	C	5	C	0	C	0	C	0	C	15	B	5	C	0	C	0	C	0	A	0	C	25	47.50	12.42%	Baja	Medio	Baja	Alta
10	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	C	25	B	15	A	0	B	5	113.75	29.74%	Media	Medio	Media	Media
11	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	C	25	C	25	155.00	40.52%	Alta	Medio	Alta	Baja
12	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	B	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja
13	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	C	25	B	5	B	5	B	15	A	0	C	25	141.25	36.93%	Alta	Medio	Alta	Baja
14	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	B	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja
15	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	A	0	B	15	B	0	C	25	130.00	33.99%	Media	Medio	Media	Media
16	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	C	25	B	0	A	0	121.25	31.70%	Media	Medio	Media	Media
17	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	D	45	131.25	34.31%	Media	Medio	Media	Media
18	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	B	5	B	5	A	0	C	25	A	0	C	25	155.00	40.52%	Alta	Medio	Alta	Baja
19	C	5	C	0	C	0	C	0	C	15	B	5	C	0	C	0	C	0	A	0	C	25	47.50	12.42%	Baja	Medio	Baja	Alta
20	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	B	15	A	0	C	25	136.25	35.62%	Alta	Medio	Alta	Baja
21	D	45	D	45	B	5	D	45	D	45	C	25	B	5	A	0	D	45	A	0	D	45	250.00	65.36%	Alta	Medio	Alta	Baja
22	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	C	25	B	15	A	0	B	5	113.75	29.74%	Media	Medio	Media	Media
23	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	C	25	B	5	C	25	C	25	A	0	C	25	171.25	44.77%	Alta	Medio	Alta	Baja
24	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	B	5	B	5	C	25	C	25	C	25	C	25	167.50	43.79%	Alta	Medio	Alta	Baja
25	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	C	25	B	15	A	0	B	5	113.75	29.74%	Media	Medio	Media	Media
26	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	C	25	B	5	B	5	B	15	A	0	A	0	116.25	30.39%	Media	Medio	Media	Media
27	B	5	A	0	D	45	C	25	B	5	C	25	C	25	C	25	B	15	B	0	B	5	160.00	41.83%	Alta	Medio	Alta	Baja
...																												
119	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja
120	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	B	5	C	25	C	25	C	25	A	0	C	25	181.25	47.39%	Alta	Medio	Alta	Baja

Fuente: Elaboración propia.

Los casos donde la vulnerabilidad es clasificada como baja generalmente corresponden a valores más bajos de  $I_v$ , lo que sugiere una mejor conformidad con las prácticas de construcción seguras y resistencia sísmica. Esta evaluación detallada permite a los propietarios, constructores y autoridades locales identificar áreas críticas que requieren intervención para mejorar la resiliencia sísmica de las estructuras y, por ende, reducir el riesgo para los habitantes en caso de un sismo. Además, la clasificación en diferentes categorías de riesgo facilita la priorización de recursos y esfuerzos para las intervenciones más críticas primero.

**Figura 40**

*Vulnerabilidad, Peligro, Riesgo y Resiliencia sísmica.*



Fuente: Elaboración propia.

La figura 40, presenta una visualización de la distribución de vulnerabilidad, peligro, riesgo, e índice de resiliencia para una muestra de viviendas, según los resultados obtenidos en el análisis anterior de 120 viviendas autoconstruidas. Aquí está el desglose de cada categoría:

- ✓ **Vulnerabilidad:** La mayoría de las viviendas (58.33%) tienen una alta vulnerabilidad, lo que indica que son considerablemente susceptibles a daños en caso de un sismo,

posiblemente debido a la calidad de construcción, materiales utilizados, o la falta de cumplimiento con las normativas sísmicas. Un 37.50% tiene una vulnerabilidad media, y solo un 4.17% está clasificado como baja vulnerabilidad, mostrando un grado aceptable de resistencia sísmica.

- ✓ **Peligro:** En este caso, 100% de las viviendas están en la categoría de peligro medio, para este estudio, lo cual puede interpretarse como un nivel uniforme de amenaza sísmica en la zona analizada, sin variaciones significativas de peligro entre las viviendas.
- ✓ **Riesgo:** Similar a la vulnerabilidad, la distribución del riesgo es predominantemente alta (58.33%), sugiriendo que una gran parte de las viviendas no solo son vulnerables, sino que también enfrentan un alto riesgo de sufrir daños significativos en caso de un evento sísmico. Esto refleja la urgente necesidad de intervenciones para mejorar la resiliencia sísmica.
- ✓ **Índice de Resiliencia:** La resiliencia, que indica la capacidad de las estructuras para resistir y recuperarse de los daños, muestra que una gran mayoría tiene baja resiliencia (58.33%). Esto es preocupante, ya que estas estructuras no solo están en riesgo de sufrir daños, sino que también les faltaría la capacidad de recuperarse eficazmente después de un sismo. Solo un pequeño porcentaje (4.17%) posee alta resiliencia.

Esta información es crucial para la planificación de mejoras en la infraestructura, fortalecimiento de edificaciones existentes, y la implementación de normativas de construcción más estrictas en áreas con alta vulnerabilidad y riesgo. Se enfatiza la necesidad de priorizar inversiones en mejoras estructurales y educación sobre construcción segura para aumentar la resiliencia de estas comunidades frente a desastres naturales.

#### ***4.1.3. Análisis matemático para la obtención de los índices de resiliencia sísmica***

#### **4.1.3.1. Selección de las señales sísmicas**

La elección de las señales sísmicas se realizó siguiendo los criterios definidos en el marco teórico. Estas señales se obtuvieron de las bases de datos del PEER (2020), de donde se seleccionaron 8 pares de señales, y del CISMID (2022), de donde se obtuvieron 3 pares adicionales. Los criterios considerados para la selección fueron los siguientes:

- Una aceleración pico efectiva superior a 0.2g y una velocidad pico efectiva mayor a 15 cm/s.
- Magnitudes superiores a 6.5.
- Una frecuencia máxima útil inferior a 0.25 Hz, garantizando así la inclusión de contenido en frecuencias bajas.
- Sismos originados en fallas de tipo rumbo, normales o inversas.

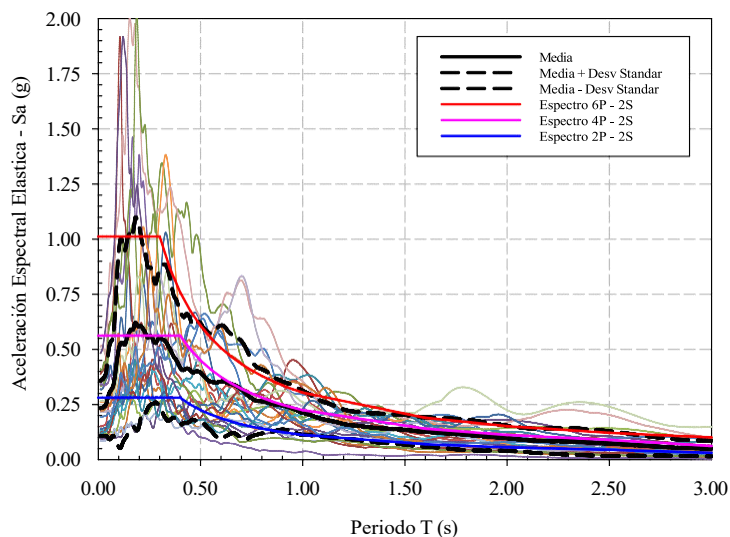
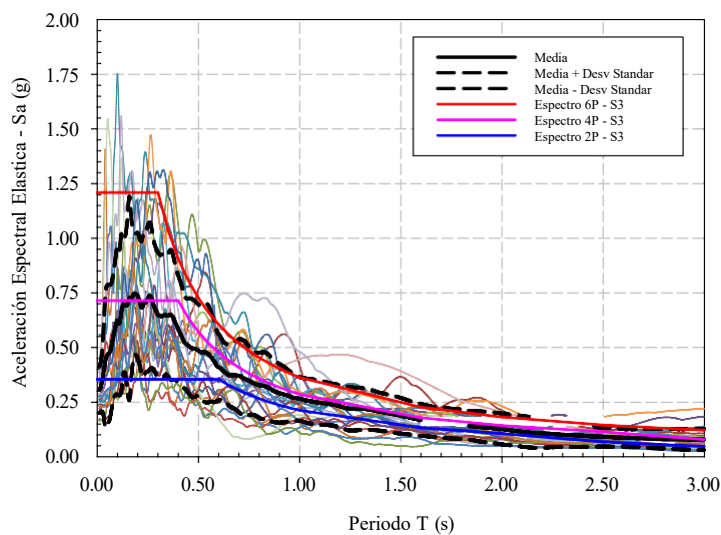
Luego de establecer estos criterios, se identificaron los grupos de señales más representativos conforme a la normativa peruana de diseño sismorresistente E-30. Se clasificaron en dos tipos de perfiles: Tipo S2 para suelos intermedios, con velocidades de propagación de ondas de corte entre 180 m/s y 500 m/s, y Tipo S3 para suelos blandos, con velocidades de propagación inferiores a 180 m/s.

#### **4.1.3.2. Espectros de Respuesta.**

Para la obtención de los espectros de respuesta, se utilizó el software Degtra (M. Ordaz & Montoya, 2013), En este proceso, se calcularon los espectros de respuesta elásticos para cada una de las señales seleccionadas, empleando un coeficiente de amortiguamiento del 5% respecto al crítico. Este método asegura una evaluación precisa de la respuesta sísmica bajo las condiciones especificadas.

**Figura 41**

*Espectro de respuesta elástico  $\xi = 5\%$ , (a) G1 para el tipo S2 y (b) G2 para el tipo S3.*

**(a)****(b)**

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 41 ilustra los espectros de respuesta obtenidos para diferentes tipos de suelos, conforme a la normativa sismorresistente E-030. En esta figura, se muestran los resultados normalizados en términos de amplitudes espectrales, ajustados a la aceleración máxima de cada registro. Además, se incluyen el promedio y la desviación estándar para cada grupo de señales, proporcionando una representación estadística de la variabilidad en la respuesta sísmica.

La evaluación de las incertidumbres asociadas con la amenaza sísmica considera un amplio conjunto de registros sísmicos que reflejan las condiciones geotectónicas predominantes del suelo. Para este estudio, se han identificado dos grupos de suelos, y los registros sísmicos seleccionados fueron analizados teniendo en cuenta las características específicas de estos suelos. Esta aproximación asegura que los espectros de respuesta reflejen de manera precisa las condiciones sismológicas específicas de cada tipo de suelo.

#### **4.1.3.3. Análisis de edificios autoconstruidos**

En el contexto de esta investigación, se seleccionaron tres viviendas de 2, 4 y 6 niveles como casos ilustrativos para el análisis, escogidas por representar de manera óptima, según el criterio del investigador y sus asesores, la configuración típica de las edificaciones autoconstruidas. Estas estructuras ejemplifican un sistema híbrido, siendo rígidas en una dirección y flexibles en la otra. Este comportamiento dual se manifiesta con rigidez en las fachadas laterales colindantes y flexibilidad en la fachada principal, lo que es crucial para entender las dinámicas estructurales en respuesta a cargas externas.

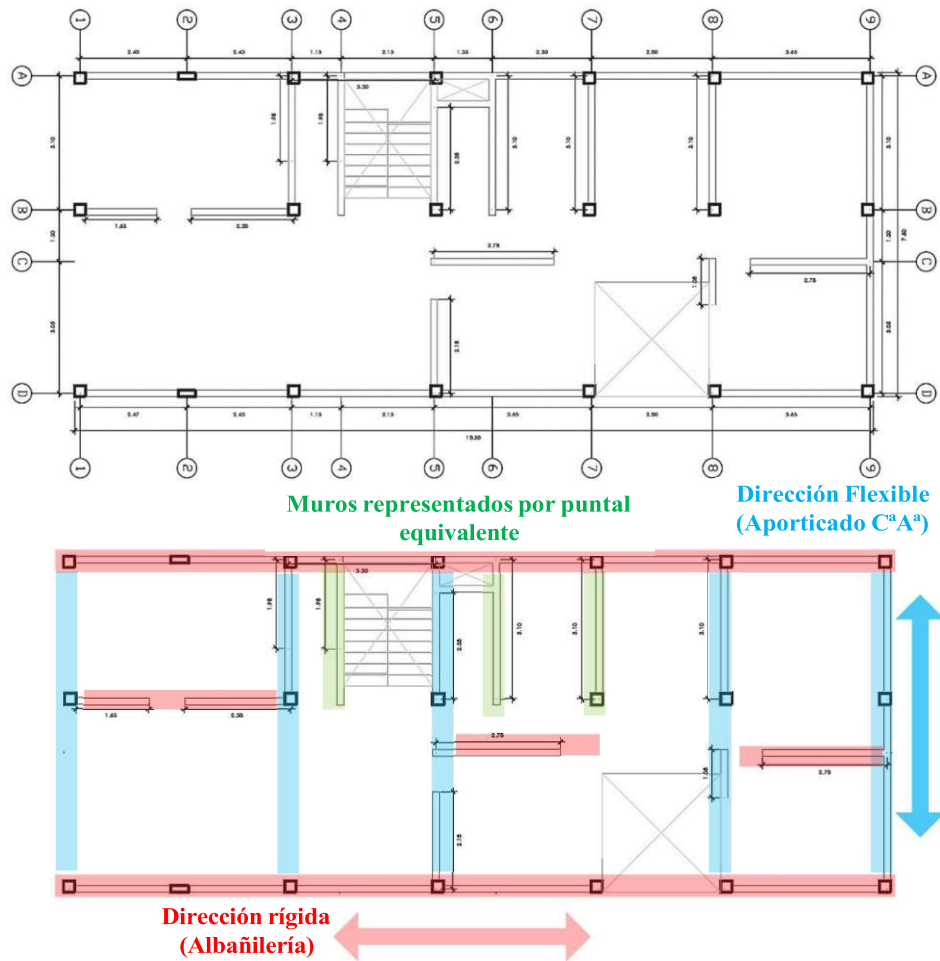
En esta investigación, se han analizado edificaciones diseñadas para disipar energía de manera eficiente, ajustándose a las condiciones del suelo Tipo S3 (ASCE, 2014), con coeficientes de aceleración base  $A_a$  y  $A_v$  ambos de 0.25. Estos valores son representativos de zonas con alta amenaza sísmica, según lo establecido en la normativa E30. Las estructuras evaluadas con un nivel bajo de desempeño sísmico (DMI) son aquellas que no han sido diseñadas siguiendo criterios especializados de sismorresistencia, o bien, que han sido proyectadas para soportar niveles más bajos de aceleración sísmica de lo recomendado.

La figura 42 adjuntas ilustran las principales características geométricas de los modelos analizados, teniendo en cuenta las directrices de diseño de la norma E30. Estos modelos representan viviendas autoconstruidas de 2, 4 y 6 niveles que utilizan un sistema híbrido de

construcción, mostrando rigidez en una dirección y flexibilidad en la otra, lo cual es fundamental para entender sus respuestas estructurales ante cargas sísmicas.

**Figura 42**

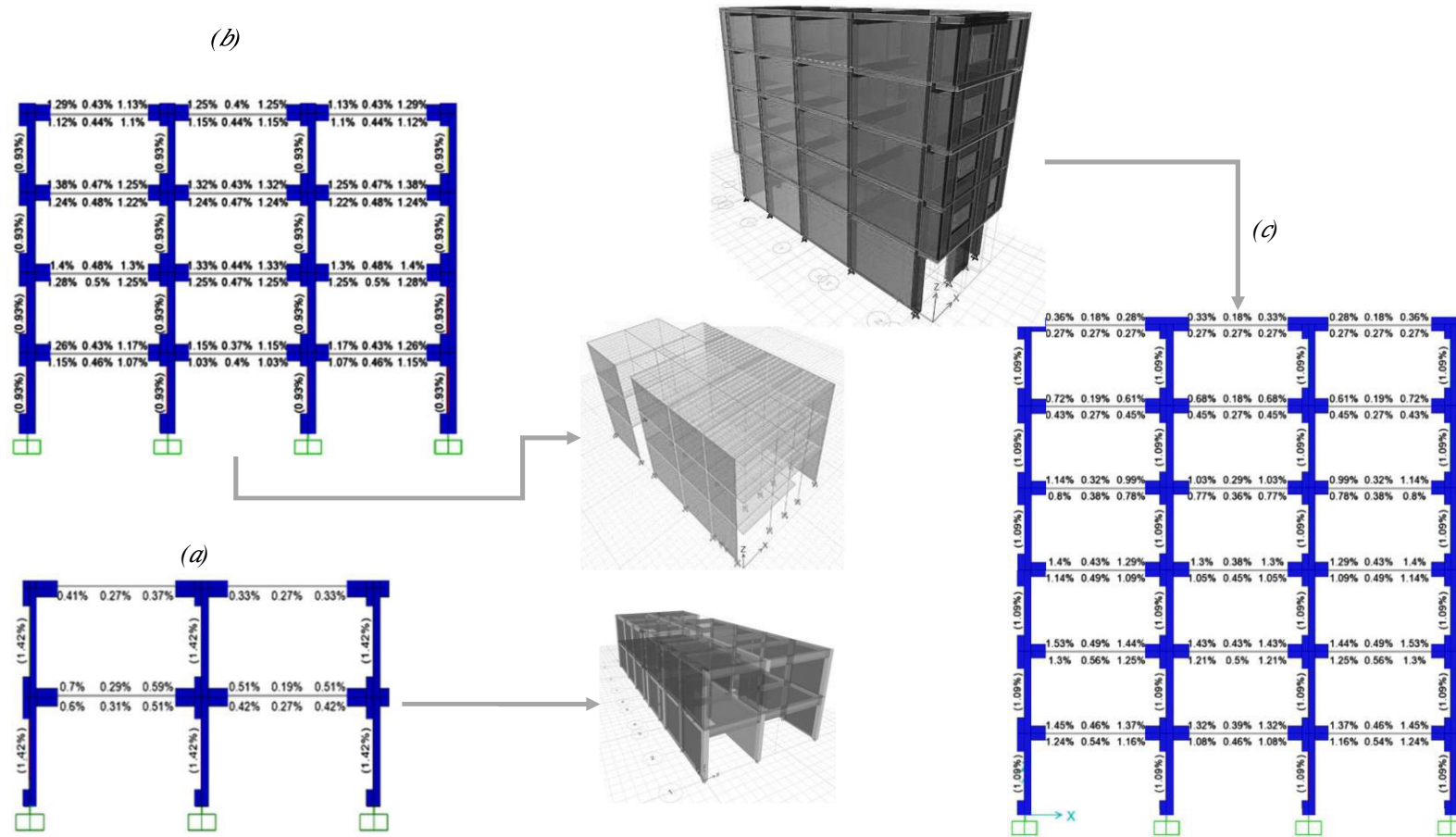
*Orientación de los componentes rígidos y flexibles, de los sistemas híbridos en la autoconstrucción de viviendas.*



Fuente: Elaboración propia.

Figura 43

Edificios de vivienda analizados, (a) 2, (b) 4 y (c) 6 niveles, en su lado flexible (sistema aporticado).



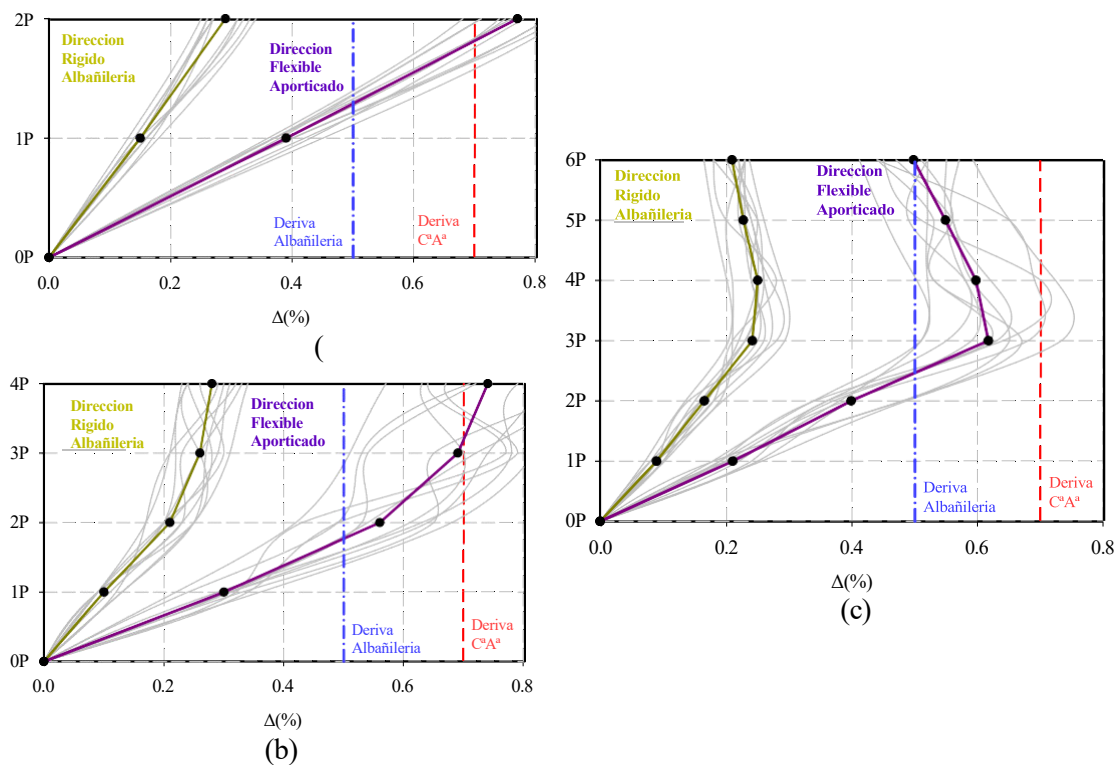
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.3.4. Análisis numérico de las viviendas autoconstruidas (2, 4 y 6 pisos).

Para este estudio y con el propósito de ilustrar la metodología para la determinación del índice de resiliencia, se seleccionaron tres tipos de edificios con pórticos especiales de concreto armado resistentes a momentos, cada uno con 3, 4 y 6 niveles respectivamente. Estas estructuras están situadas en una zona de alta amenaza sísmica, con un valor de  $A_a = 0.25 g$ , y representan un diseño convencional típico de viviendas autoconstruidas.

**Figura 44**

*Derivas de piso para las viviendas de 2, 4 y 6 pisos.*



Fuente: Elaboración propia.

La figura 44, muestran las derivas de piso en edificaciones de 2, 4 y 6 pisos, bajo la acción sísmica, para las direcciones rígida (albañilería) y flexible (a porticado). Analizando detalladamente cada uno de ellos se realiza la siguiente interpretación:

#### Análisis de Derivas de Piso

✓ **Tendencia General de las Derivas:**

- En todos los casos, se observa que la derivación en la dirección rígida es menor en comparación con la dirección flexible. Esto es típico en estructuras de albañilería que tienden a ser más rígidas y menos deformables bajo cargas sísmicas, lo que resulta en menores desplazamientos relativos entre pisos.
- A medida que aumenta el número de pisos, la magnitud de las derivas también aumenta, especialmente en la dirección flexible. Esto sugiere una amplificación de las respuestas sísmicas debido a la mayor altura del edificio.

✓ **Cumplimiento de Normas (Líneas Azul y Roja):**

- Para las estructuras de 2 y 4 pisos, las derivas se mantienen dentro de los límites permitidos por la normativa sismorresistente peruana E-30, tanto para albañilería (0.5%, línea azul) como para porticado (0.7%, línea roja).
- Sin embargo, en la estructura de 6 pisos, las derivas en la dirección flexible superan el límite permitido (línea roja) en los pisos superiores, indicando un potencial riesgo estructural que requiere atención. Es importante destacar que la derivada en albañilería para esta estructura aún se mantiene dentro del límite.

✓ **Implicaciones Estructurales:**

- Las derivas más allá de los límites establecidos pueden implicar riesgos de daño estructural o incluso colapso, particularmente en eventos sísmicos significativos. La superación de estos límites en estructuras altas en la dirección flexible sugiere que podría ser necesario revisar el diseño sísmico o implementar refuerzos estructurales para mejorar la respuesta sísmica.

✓ **Análisis Estadístico:**

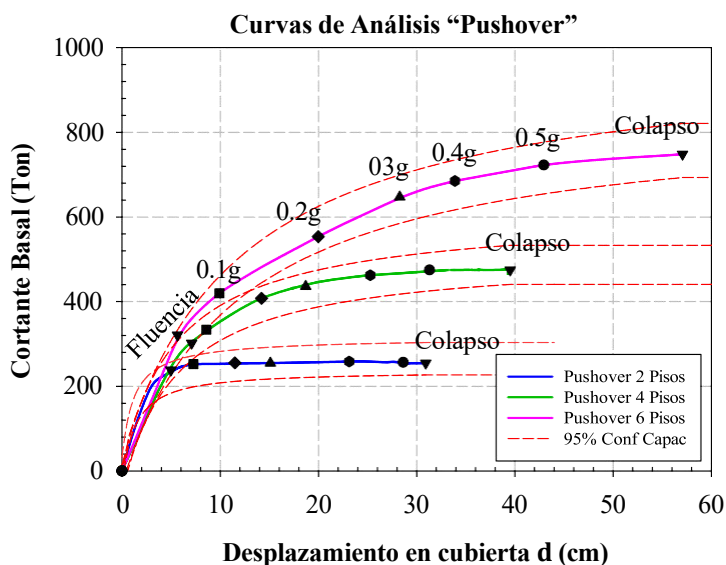
- El uso de la media y la desviación estándar en estos gráficos indica la variabilidad de las respuestas entre las diferentes señales sísmicas analizadas. Una baja desviación estándar en las derivas de piso para la dirección rígida (albañilería) refuerza la percepción de que este tipo de estructura ofrece un comportamiento más uniforme y predecible bajo sismicidad.

#### 4.1.3.5. Desempeño de las viviendas autoconstruidas

Cada una de las viviendas autoconstruidas se somete a análisis básicos para entender su comportamiento estructural esperado y facilitar comparaciones entre los distintos tipos de construcción considerados.

**Figura 45**

*Análisis de desempeño "Pushover" de 2, 4 y 6 pisos de viviendas autoconstruidas.*



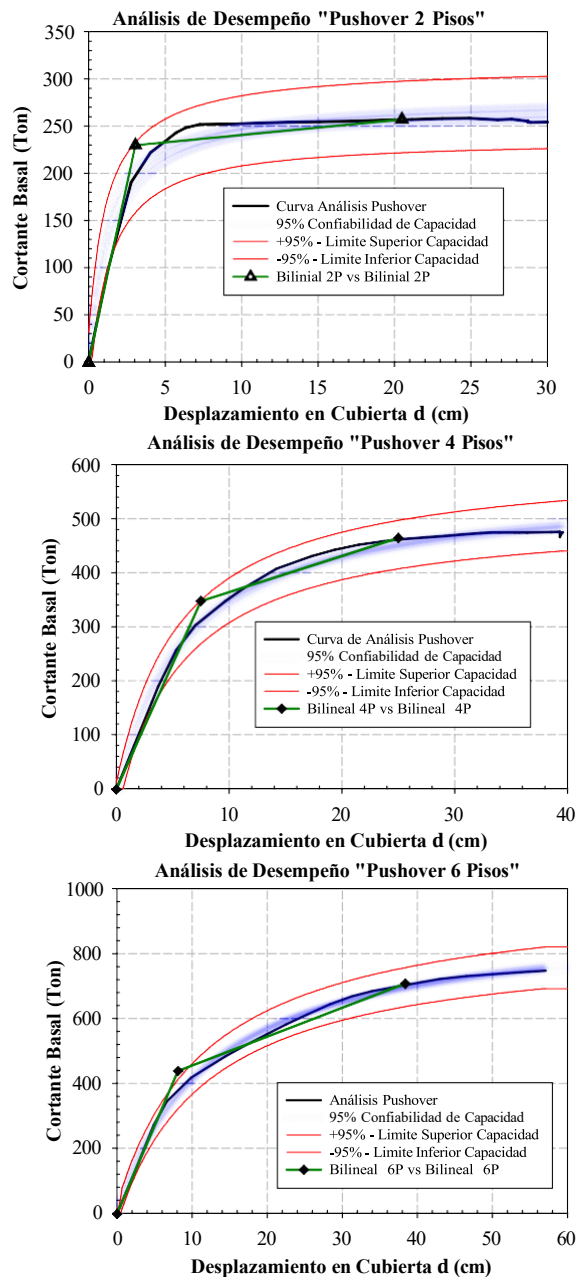
Fuente: Elaboración propia.

La figura 46, muestra las curvas de empuje horizontal (curvas "pushover") obtenidas a través de un modelo simplificado de rótulas plásticas para cada prototipo de edificación. Adicionalmente, se llevan a cabo análisis no lineales simplificados (según ATC, 1996) para

determinar el punto de desempeño específico de cada edificación bajo diferentes niveles de aceleración máxima del terreno, que incluyen 0.1g, 0.2g, 0.25g, 0.35g y 0.5g, manteniendo la forma espectral establecida en el diseño.

**Figura 46**

*Análisis de desempeño "Pushover" de 2, 4 y 6 pisos y conversión Bilineal.*



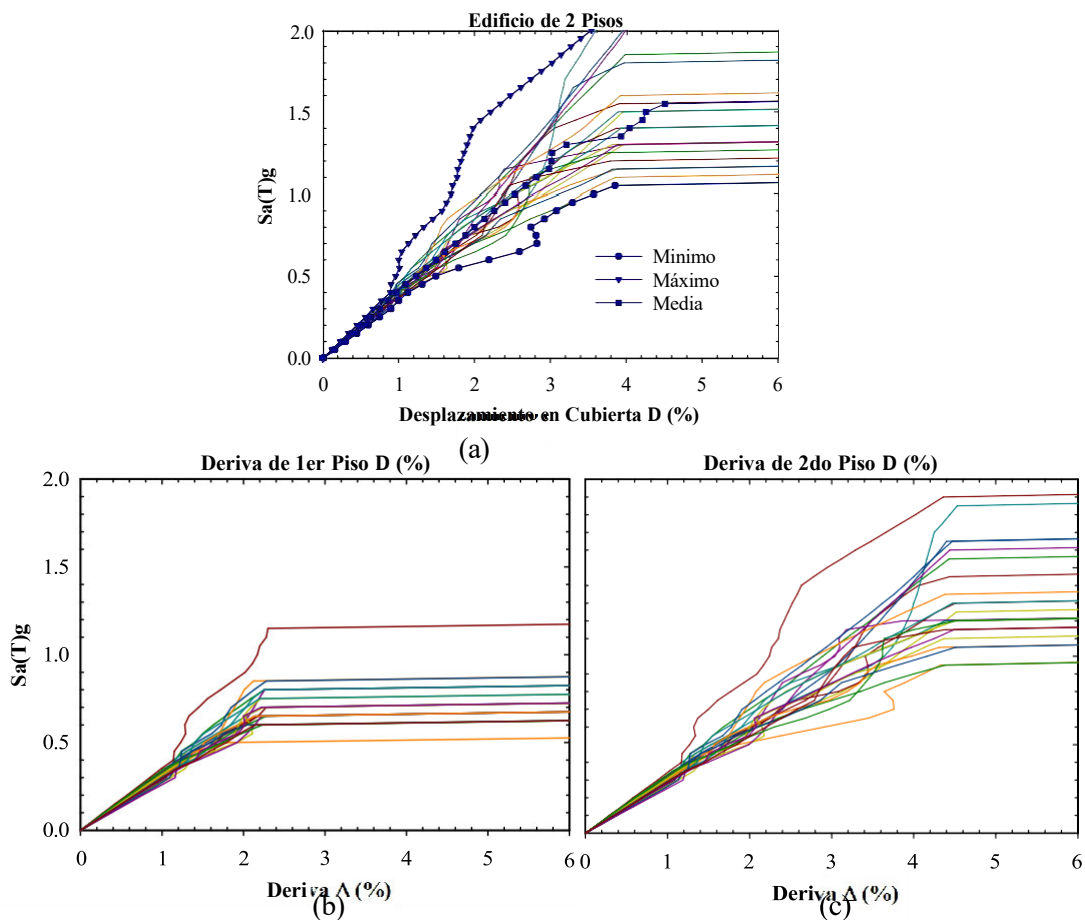
Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.6. Análisis IDA

Se desarrolla a análisis dinámico incremental (IDA) a partir de las curvas de desempeño para las viviendas autoconstruidas, donde expresan de mejor manera el comportamiento de los sistemas estructurales.

Figura 47

Análisis IDA para la edificación de la vivienda autoconstruida de 2 pisos.



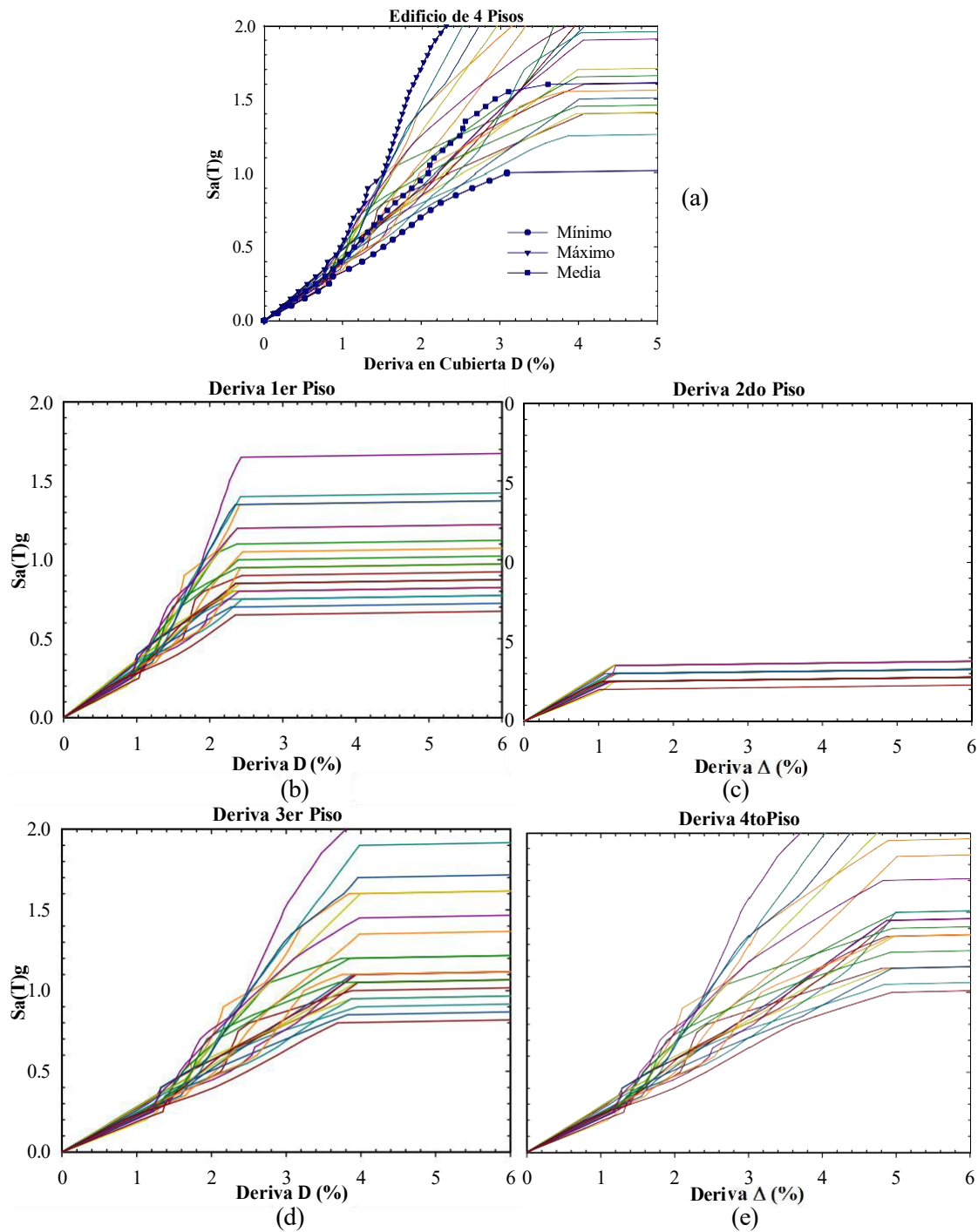
Fuente: Elaboración propia.

El análisis incremental dinámico (IDA) simplificado representado en la figura indica que el primer piso muestra una alta sensibilidad al colapso, alcanzando una deriva de piso del 1.95%. Esta alta deriva sugiere una concentración significativa de daños en el primer nivel de la vivienda autoconstruida. Este comportamiento fue observado al someter la estructura a 22

registros sísmicos seleccionados específicamente para este estudio, evidenciando la vulnerabilidad del diseño y la ejecución en la construcción de estas edificaciones.

**Figura 48**

*Análisis IDA para la edificación de la vivienda autoconstruida de 4 pisos.*



Fuente: Elaboración propia.

La figura 48, ilustran los resultados del análisis dinámico incremental (IDA) para un edificio de 4 pisos autoconstruido, sometido a diferentes registros sísmicos. Estos muestran la respuesta del edificio en términos de deriva por piso, una métrica crucial para evaluar la capacidad de deformación antes del colapso estructural bajo cargas sísmicas.

- ✓ **Deriva en Cubierta (figura a):** La gráfica muestra variaciones significativas entre los máximos, mínimos y el promedio de las derivas registradas. Los valores crecen sustancialmente a medida que la intensidad sísmica aumenta, alcanzando puntos críticos que pueden sugerir un riesgo inminente de falla estructural para condiciones extremas.
- ✓ **Deriva del 1er Piso (figura b):** Se observa que este nivel alcanza derivas significativamente altas, superiores al 2.24% en algunos casos, lo cual es indicativo de una sensibilidad elevada al colapso. Este piso muestra la mayor vulnerabilidad, destacando una concentración de daños potencialmente grave, probablemente debido a deficiencias en la rigidez o resistencia de los materiales usados, o fallos en la ejecución constructiva.
- ✓ **Deriva del 2do Piso (figura c):** Aunque este piso también muestra aumentos en la deriva bajo cargas incrementales, el comportamiento es relativamente más controlado comparado con el primer piso. Sin embargo, derivas cercanas al 1.18% indican un nivel significativo de daño potencial.
- ✓ **Deriva del 3er y 4to Piso (figura d y e):** Estos pisos exhiben un comportamiento similar entre sí con derivas que, si bien aumentan con la intensidad del sismo, se mantienen dentro de rangos que sugieren una mejor capacidad de respuesta que los

pisos inferiores. Sin embargo, las derivas alcanzadas también señalan la necesidad de revisar aspectos de diseño y construcción para mejorar su desempeño sísmico.

El edificio muestra una respuesta variada a los sismos en sus diferentes niveles, lo cual refleja inconsistencias en la distribución de rigidez y resistencia a través de su altura, características comunes en edificaciones autoconstruidas. El análisis sugiere una vulnerabilidad crítica especialmente en los pisos bajos, con una capacidad de resiliencia que decrece significativamente con la altura. Esto subraya la importancia de aplicar prácticas de construcción más rigurosas y revisar las normativas de diseño estructural para este tipo de edificaciones.

La Figura 49, muestra el análisis de deriva dinámica incremental (IDA) para un edificio de vivienda autoconstruido de 6 niveles. A través de este análisis, podemos observar la respuesta estructural del edificio bajo diferentes niveles de sismicidad aplicados. Cada gráfico representa la deriva máxima alcanzada en cada piso del edificio ante diferentes intensidades sísmicas.

#### **Análisis de los gráficos:**

1. **Deriva en Cubierta:** Muestra que las derivas incrementan significativamente con la intensidad del sismo. Observamos que las líneas que representan los máximos alcanzan derivas cercanas al 5%, indicativo de un comportamiento muy flexible y posiblemente inseguro en eventos sísmicos fuertes.
2. **Primer Piso:** Presenta una variabilidad considerable en las respuestas, con algunas llegando a más del 5% de deriva, lo cual es un indicativo claro de vulnerabilidad estructural crítica, posiblemente debido a una falta de rigidez adecuada o a deficiencias en los materiales y técnicas de construcción.

3. **Segundo al Sexto Piso:** Las derivas tienden a estabilizarse y son menos severas en pisos superiores, sugiriendo que los daños serían menos significativos en estas zonas durante un sismo. Sin embargo, el segundo piso muestra una sensibilidad particular, posiblemente por transferencias de carga desde el primer piso más comprometido.

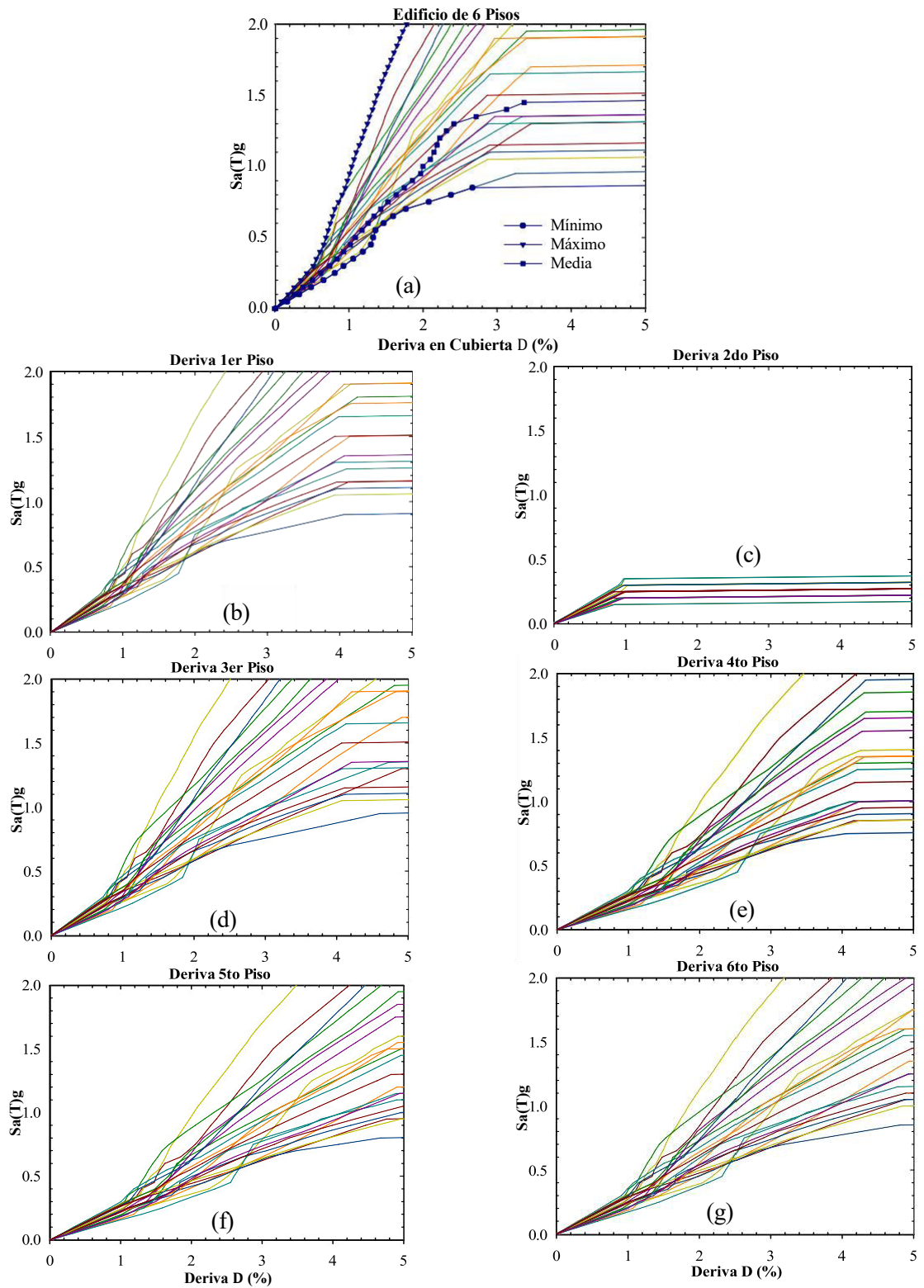
**Conclusiones y recomendaciones:**

- **Vulnerabilidad del Primer Piso:** El análisis sugiere que la planta baja es críticamente vulnerable y podría ser el punto de inicio para un colapso progresivo en caso de sismo severo. Sería prudente reforzar este nivel con elementos estructurales adicionales o mediante técnicas de construcción mejoradas.
- **Comparación con Normativa E30:** Si bien la deriva permitida según la normativa es superada ampliamente en algunos casos, es vital considerar refuerzos o rediseños para asegurar que la estructura pueda soportar cargas sísmicas sin alcanzar estados de daño severo o colapso.
- **Importancia del Diseño Adecuado:** Este edificio ilustra los riesgos de la autoconstrucción sin supervisión técnica adecuada, destacando la necesidad de asesoramiento profesional durante la construcción de viviendas en zonas sísmicas.

Estos resultados subrayan la importancia de aplicar principios de ingeniería estructural adecuados y de seguir las recomendaciones normativas para el diseño y la construcción en regiones sísmicamente activas.

Figura 49

Análisis IDA para la edificación de la vivienda autoconstruida de 6 pisos.



Fuente: Elaboración propia.

#### **4.1.4. Función de distribución acumulada**

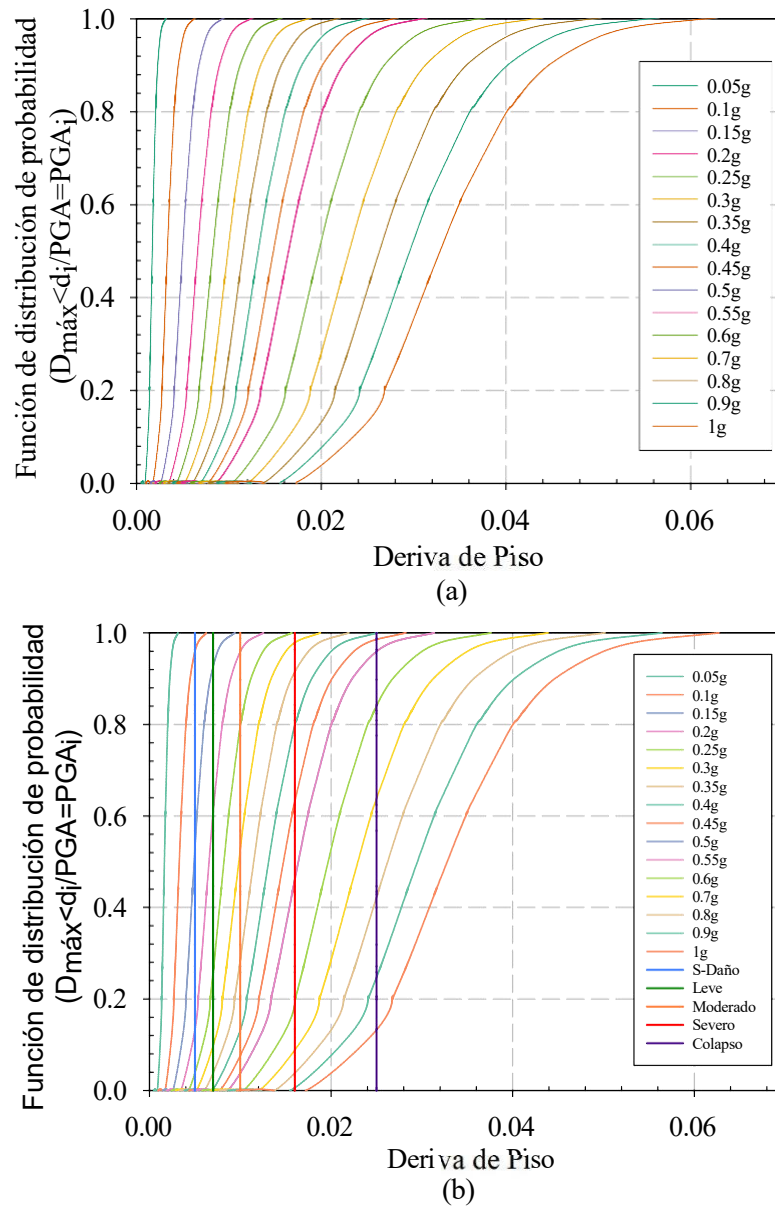
Dada la variabilidad observada en los resultados a un mismo nivel de intensidad sísmica, existe una inherente aleatoriedad que justifica la generación de curvas de función de probabilidad acumulada. Para identificar la distribución que mejor se ajusta a los datos recopilados, se realizó un análisis comparativo entre las distribuciones normal y log-normal.

Este proceso comenzó con la ordenación de las derivas de piso de menor a mayor, seguido de la determinación de la media y la desviación estándar de estas observaciones. Utilizando estos parámetros, se calcularon los valores para ambas distribuciones teóricas. La comparación entre los datos observados y los valores teóricos permitió identificar la distribución con la menor discrepancia, que fue la seleccionada para su uso posterior.

Las Figuras 51 y 52 ilustran el desarrollo de las curvas para cada distribución analizada, ofreciendo una visualización clara del ajuste de cada modelo a los datos reales. Estas gráficas son fundamentales para entender la dispersión y tendencias en la respuesta sísmica de las edificaciones analizadas.

**Figura 50**

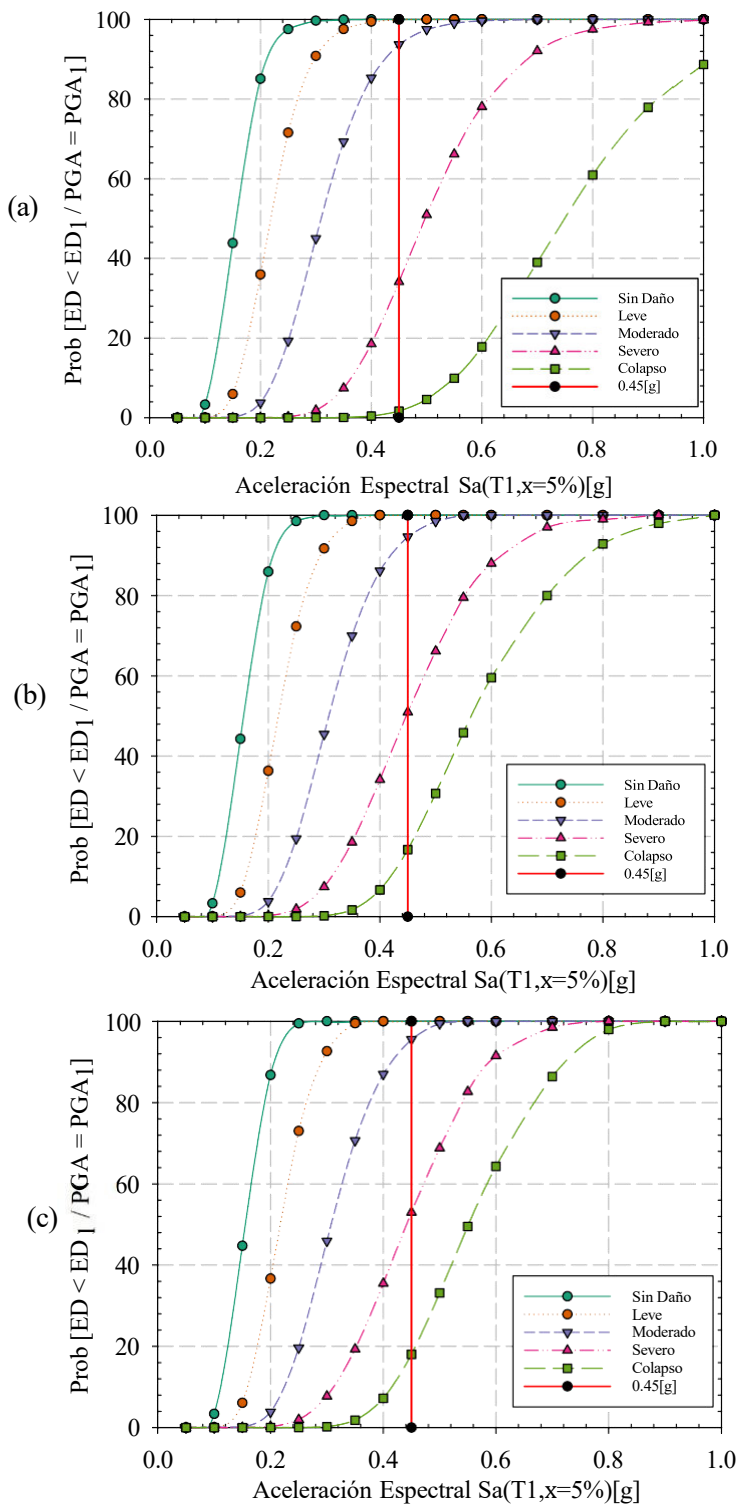
Curvas de función de distribución de probabilidad acumulada para cada aceleración considerada, para los 22 registros sísmicos para el modelo representativo 2, 4 y 6 niveles



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 51**

*Curvas de fragilidad para los modelos de 2, 4 y 6 niveles.*



Fuente: Elaboración propia.

Las curvas de fragilidad presentan la probabilidad de excedencia versus la aceleración espectral  $S_a$  ( $T_1$ , 5%) en g. Estas curvas son esenciales para entender cómo se espera que las estructuras respondan bajo diferentes niveles de fuerza sísmica. Los diferentes colores y formas de las líneas en las gráficas representan la probabilidad de alcanzar o exceder niveles de daño específicos, desde "Sin Daño" hasta "Colapso". **Sin Daño y Leve:** Observamos que, para daños leves, la probabilidad de ocurrencia se mantiene muy baja hasta alcanzar aceleraciones moderadamente altas, lo cual indica una buena resistencia inicial de las estructuras frente a sismos de menor intensidad. **Daño Moderado y Severo:** A medida que la aceleración aumenta, la probabilidad de daño moderado y severo crece significativamente, siendo evidente en todas las edificaciones. Específicamente, para las viviendas de 4 y 6 niveles, la transición de daño moderado a severo ocurre con una mayor probabilidad alrededor de  $S_a$  ( $T_1$ , 5%)=0.4g a 0.6g, lo cual es una señal de alerta para considerar en la evaluación de la seguridad estructural. **Colapso:** El punto crítico donde las estructuras están en riesgo significativo de colapso se muestra en las curvas donde la aceleración espectral supera el 0.7g, especialmente para las edificaciones de mayor altura.

**Tabla 28**

*Probabilidad de excedencia y ocurrencia para una intensidad sísmica de 0.45g para.*

<b>Vivienda 6 Pisos</b>		
<b>Probabilidad de Excedencia</b>	<b>Probabilidad de Ocurrencia</b>	<b>Estado de Daño</b>
<b>100.00%</b>	0.80%	Sin Daño
<b>99.20%</b>	6.50%	Leve
<b>92.70%</b>	55.20%	Moderado
<b>37.50%</b>	33.70%	Severo
<b>3.80%</b>	3.80%	Colapso
<b>Vivienda 4 Pisos</b>		
<b>100.00%</b>	0.00%	Sin Daño
<b>100.00%</b>	5.58%	Leve
<b>94.42%</b>	42.08%	Moderado
<b>52.34%</b>	34.54%	Severo
<b>17.80%</b>	17.80%	Colapso
<b>Vivienda 2 Pisos</b>		

<b>100.00%</b>	0.55%	Sin Daño
<b>99.45%</b>	4.03%	Leve
<b>95.42%</b>	42.08%	Moderado
<b>53.34%</b>	34.54%	Severo
<b>18.80%</b>	18.80%	Colapso

Fuente: Elaboración propia.

Las curvas de fragilidad mostradas en la figura 52 y los datos en las tablas 28, ofrecen un análisis detallado sobre la susceptibilidad de diferentes viviendas autoconstruidas a sufrir daños en función de la aceleración espectral experimentada durante un sismo. La estructura del análisis se centra en tres tipos de edificaciones: de 2, 4 y 6 niveles.

#### **Interpretación de las Tablas:**

Las tablas adjuntas detallan las probabilidades de ocurrencia de diferentes estados de daño para cada tipo de edificación en respuesta a los niveles de aceleración espectral. Estos datos son coherentes con las curvas de fragilidad y proporcionan un resumen numérico que facilita la comparación directa entre los diferentes tipos de estructuras.

- **Vivienda de 4 Pisos:** El 17.80% de probabilidad de colapso a partir de una cierta intensidad de aceleración resalta un punto de vulnerabilidad crítico para esta configuración de edificación. Es importante notar que el estado de daño "severo" tiene una probabilidad de ocurrencia del 34.54% cuando la aceleración supera el 0.5g.
- **Vivienda de 6 Pisos:** Aunque la configuración más alta muestra un leve aumento en la resiliencia inicial (menor probabilidad de daño leve), también presenta un riesgo similar de colapso (18.80%), lo que indica que la altura adicional no necesariamente implica una mayor vulnerabilidad global, pero sí modifica cómo y cuándo los daños son más probables.

Los análisis demuestran claramente cómo la falta de diseño y construcción técnica adecuada afecta negativamente la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas. La

necesidad de implementar mejoras en las prácticas de construcción y en la supervisión técnica es crítica para aumentar la seguridad de estas estructuras. Además, los datos sugieren que las intervenciones para reforzar o mejorar las edificaciones deben ser especialmente enfocadas en aquellos niveles donde la probabilidad de daño severo o colapso es más alta.

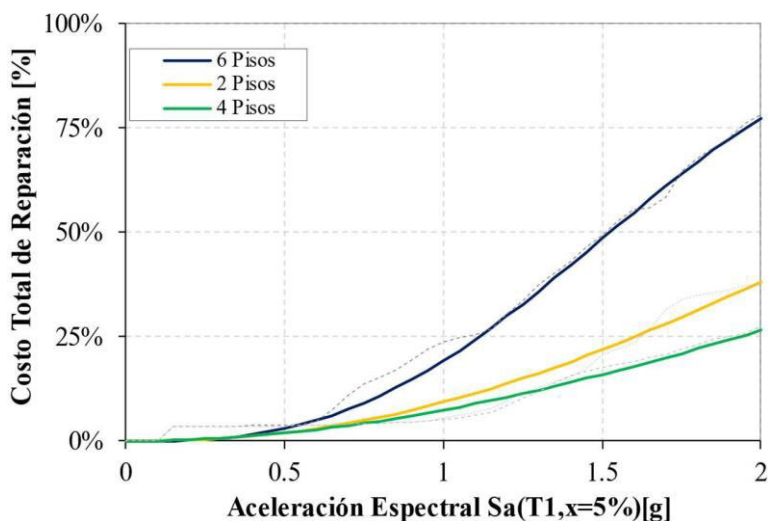
#### **4.1.4.1. Funciones de vulnerabilidad**

La vulnerabilidad fue evaluada empleando el software IT-FUNVUL-V2, diseñado para edificaciones autoconstruidas de 2, 4 y 6 niveles. Los resultados que se presentan a continuación corresponden a un análisis exhaustivo de una edificación en particular. En las representaciones gráficas, el eje horizontal muestra la intensidad sísmica seleccionada, definida aquí como la aceleración espectral  $S_a(T_1, \xi=5\%)$  [g], correspondiente al periodo de vibración del modo fundamental de la estructura. Los costos y tiempos de reparación fueron adaptados a partir de Aroquipa et al. (2023), y las funciones de vulnerabilidad fueron procesadas mediante el IT-FUNVUL. Este análisis incorpora una base de datos de daños estructurales previamente recopilados, seleccionando funciones de fragilidad específicas para cada tipo de componente estructural en cada nivel. Además, se evalúa el número de componentes por piso y se analiza la existencia de correlaciones en los daños entre componentes similares. Este enfoque permite estimar con mayor precisión la vulnerabilidad estructural de cada nivel de la edificación, teniendo en cuenta la variabilidad en la calidad y ejecución de la construcción autoconstruida. La figura 52 muestra claramente las funciones de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones autoconstruidas examinadas, destacando variaciones significativas en la respuesta estructural frente a sismos de intensidades moderadas a severas. Entre las edificaciones analizadas, la de seis pisos exhibe una mayor capacidad de resistencia sísmica, presentando una curva de vulnerabilidad que asciende de manera más gradual en comparación con las estructuras de menor altura. Este comportamiento sugiere que la edificación de seis pisos, posiblemente

debido a su diseño o a la distribución de masa y rigidez, es capaz de absorber y disipar la energía sísmica de manera más eficiente.

**Figura 52**

*Funciones de Vulnerabilidad para las viviendas de 2, 4 y 6 pisos.*

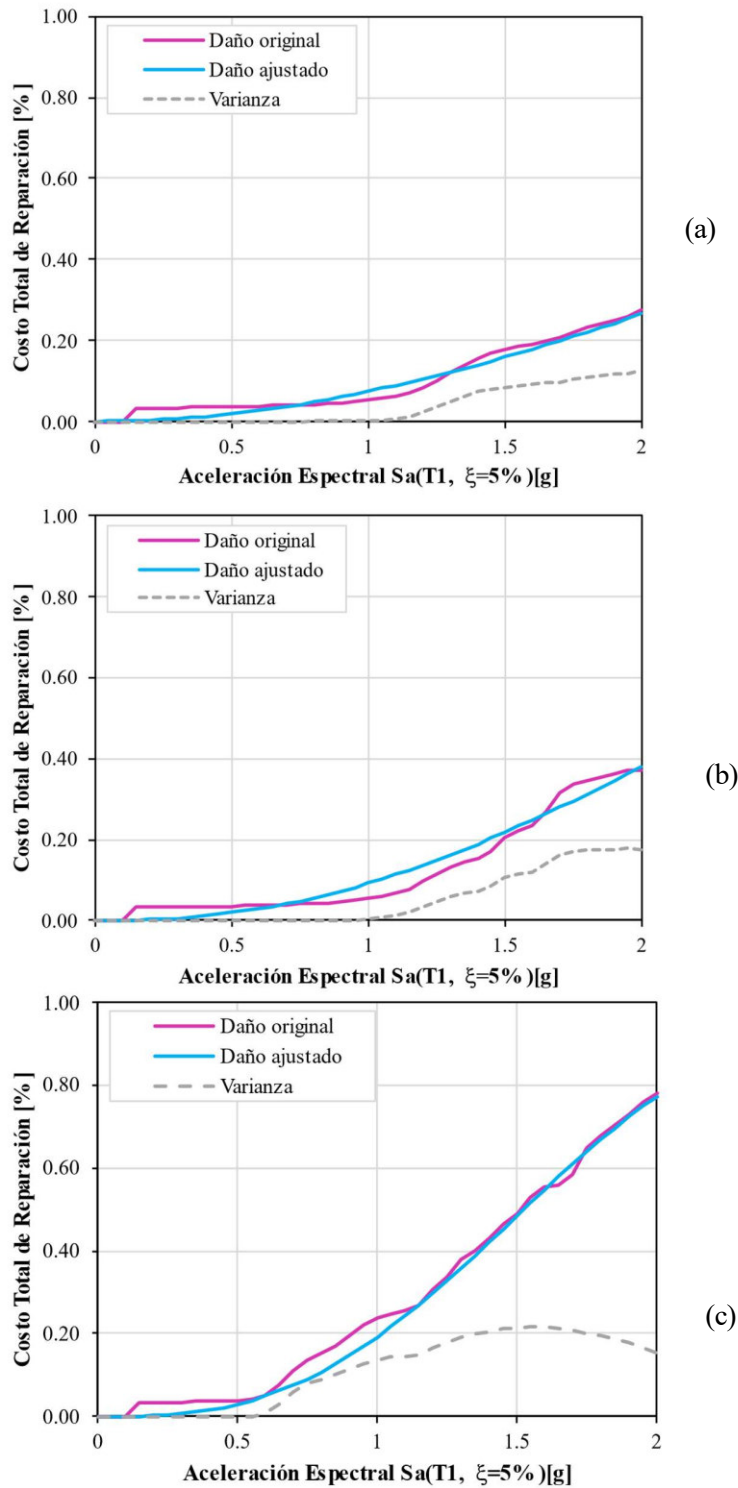


Fuente: Elaboración propia.

Contrariamente, la edificación de cuatro pisos exhibe la mayor vulnerabilidad según las curvas presentadas; su función de vulnerabilidad aumenta más rápidamente, lo que indica un mayor riesgo de daño o colapso bajo cargas sísmicas similares. Este resultado podría estar relacionado con deficiencias en el diseño estructural, la calidad de la construcción o la irregularidad en la altura que amplifica las demandas sísmicas en los pisos inferiores. Estas funciones de vulnerabilidad no solo subrayan la susceptibilidad de estas edificaciones a sufrir daños significativos en caso de sismos, sino que también proveen una base crucial para la evaluación del grado de resiliencia sísmica de cada estructura. Los resultados obtenidos forman un fundamento esencial para desarrollar estrategias dirigidas a mejorar la resistencia sísmica de este tipo de construcciones, enfocándose en intervenciones estructurales y en la mejora de los materiales y técnicas constructivas utilizadas en las viviendas autoconstruidas.

**Figura 53**

*Funciones de Vulnerabilidad para las viviendas de 2, 4 y 6 pisos. Según daños originales, suavizados y varianza.*



Fuente: Elaboración propia.

#### **4.1.4.2. Evaluación del Índice de resiliencia simplificado.**

El índice de resiliencia para tres edificaciones autoconstruidas de 2, 4 y 6 niveles fue evaluado meticulosamente utilizando una metodología integral que incorporó la degradación porcentual debida a la ausencia de supervisión técnica adecuada durante el diseño y la construcción. Además, se realizó un análisis exhaustivo de las condiciones estructurales y la calidad de los materiales empleados, centrandó la atención en la resistencia del concreto de los principales elementos estructurales.

Los resultados obtenidos de esta evaluación detallada se reflejan en la tabla y están visualizados en la figura asociada. Estos indican una variabilidad significativa en la resiliencia estructural de las edificaciones, lo que resalta la importancia crucial de una supervisión técnica competente y el uso de materiales de alta calidad para asegurar la seguridad y durabilidad de las viviendas autoconstruidas.

#### **Detalles del Índice de Resiliencia:**

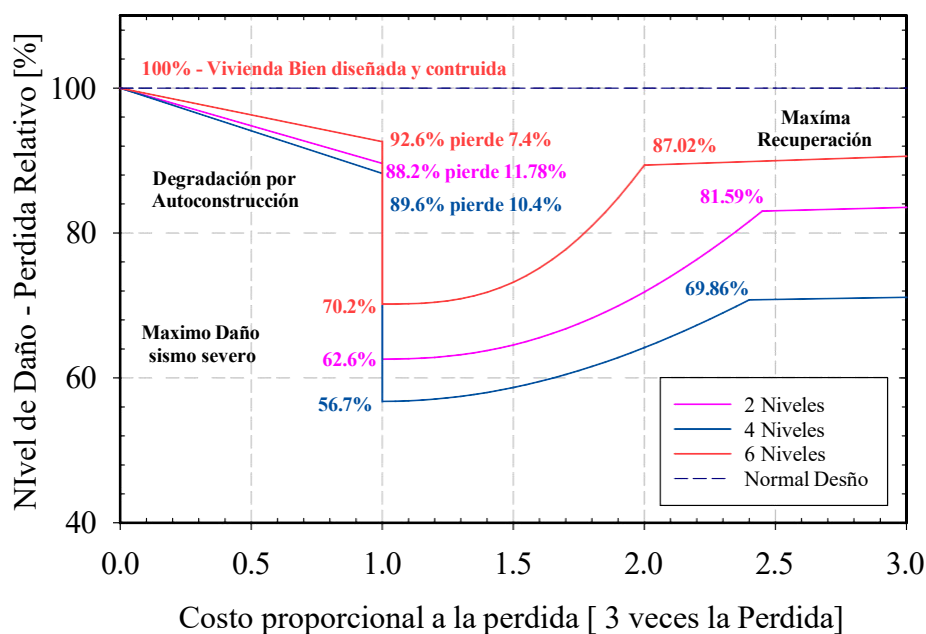
**Edificación de 2 Niveles:** Presentó un índice de resiliencia de 70.3%, lo que indica una recuperación considerable tras los daños iniciales, mostrando una relativa capacidad para restaurarse post-evento sísmico. Sin embargo, aún muestra vulnerabilidades significativas debido a la falta de directrices técnicas durante su construcción.

**Edificación de 4 Niveles:** Con un índice de resiliencia del 41.6%, esta edificación demostró ser la más vulnerable de las tres. El alto grado de daño inicial y el limitado potencial de recuperación sugieren que la estructura podría requerir una demolición o una reconstrucción extensiva, ya que la reparación podría no ser económicamente viable ni estructuralmente prudente.

**Edificación de 6 Niveles:** Mostró el mayor índice de resiliencia con un 75.1%, lo cual indica que a pesar de sufrir daños, tiene una alta capacidad de recuperación y puede resistir mejor los efectos sísmicos en comparación con las estructuras más bajas. Este comportamiento puede atribuirse a una distribución más eficiente de las fuerzas sísmicas a lo largo de su altura y posiblemente a una mejor calidad de construcción en algunos de sus componentes críticos.

**Figura 54**

*Función de resiliencia viviendas autoconstruidas de 2, 4 y 6 pisos. Según daños originales.*



Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados subrayan la relación directa entre la calidad de diseño y construcción y la resiliencia de las edificaciones frente a eventos sísmicos. El estudio también plantea la necesidad urgente de implementar mejores prácticas de construcción y supervisión en las viviendas autoconstruidas para mejorar su seguridad y funcionalidad a largo plazo. Además, sugiere que las intervenciones de mitigación y mejora deben ser específicamente adaptadas a cada tipo de edificación, considerando sus características únicas y los niveles de riesgo asociados.

**Tabla 29***índice de resiliencia*

<b>ÍNDICE DE RESILIENCIA</b>						
<b>Edificación</b>	<b>Daño Inicial</b>	<b>Daño Inicial pos-evento</b>	<b>Perdida efectiva</b>	<b>máxima Recuperación</b>	<b>Perdida Recuperada</b>	<b>IR</b>
	(a)	(b)	(a)-(b)=(c)	(d)	(a)-(d)=(e)	(e)/(c)
<b>2 niveles</b>	0.90	0.63	0.27	0.82	0.08	70.3%
<b>4 niveles</b>	0.88	0.57	0.31	0.70	0.18	41.6%
<b>6 niveles</b>	0.93	0.70	0.22	0.87	0.06	75.1%

Fuente: Elaboración propia.

## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La investigación titulada "Vulnerabilidad Estructural Ante Peligro Sísmico En Las Viviendas En La Zona X De Huaycan, Distrito Ate-Vitarte, 2023" revela aspectos críticos sobre la vulnerabilidad y la resiliencia de estructuras autoconstruidas frente a sismos. Los hallazgos confirman que, a pesar de las intenciones de minimizar costos y maximizar la accesibilidad a la vivienda, las prácticas de autoconstrucción en Lima han conducido a edificaciones con deficiencias significativas en términos de seguridad y desempeño estructural.

1. Vulnerabilidad y Desempeño Sísmico: La autoconstrucción, caracterizada por la falta de supervisión técnica y el uso de materiales de calidad cuestionable, ha generado viviendas con altas tasas de vulnerabilidad ante eventos sísmicos. Esta situación se agrava por la densidad urbana de Lima y la actividad sísmica de la región. Las simulaciones de respuesta estructural mostraron que las viviendas autoconstruidas presentan índices de daño significativos incluso ante sismos de magnitudes moderadas, lo que resalta una preocupación grave sobre la seguridad pública y la integridad estructural.

2. Evaluación de la Resiliencia Sísmica: La resiliencia de estas estructuras fue evaluada utilizando análisis IDA (Incremental Dynamic Analysis) y modelos de rótulas plásticas, que demostraron una capacidad limitada de las estructuras para absorber y disipar energía sísmica sin sufrir daños estructurales irreversibles. Las curvas de fragilidad desarrolladas indican que un porcentaje significativo de las edificaciones examinadas podrían experimentar colapsos parciales o totales bajo sismos severos.

3. Implicaciones Socioeconómicas: La falta de resiliencia sísmica tiene implicaciones directas en la vulnerabilidad social y económica de los habitantes de estas estructuras. Los altos niveles de riesgo no solo aumentan el potencial de pérdidas humanas en eventos sísmicos, sino

que también imponen una carga económica significativa en términos de reconstrucción y rehabilitación post-desastre.

4. Retos y Oportunidades para Mejoras: Identificar estas vulnerabilidades ofrece una oportunidad crítica para el desarrollo de políticas públicas y estrategias de intervención orientadas a mejorar la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas. Es esencial que los esfuerzos futuros se enfoquen en la implementación de normativas de construcción más estrictas, programas de capacitación para constructores y propietarios de viviendas, así como en la integración de tecnologías y prácticas constructivas que refuercen la integridad estructural sin incurrir en costos prohibitivos.

La investigación subraya la importancia de abordar la resiliencia sísmica desde un enfoque multidisciplinario que incluya ingeniería estructural, regulación urbana y compromiso comunitario. Al mejorar la comprensión y la gestión de la resiliencia en viviendas autoconstruidas, se puede avanzar significativamente hacia la mitigación del riesgo sísmico en áreas urbanas densamente pobladas.

## **VI. CONCLUSIONES**

### **6.1. Resiliencia sísmica insuficiente en viviendas autoconstruidas**

La investigación evidenció que la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas es generalmente baja, especialmente debido a la heterogeneidad en su diseño y ejecución. Las edificaciones de seis niveles presentaron un índice de resiliencia del **75.1%**, superior al **41.6%** registrado en las de cuatro niveles. Estas diferencias reflejan la variabilidad estructural inherente a la autoconstrucción y la influencia del área construida en la capacidad de respuesta sísmica.

### **6.2. Alta vulnerabilidad estructural ante sismos moderados y severos**

Se identificó que las viviendas autoconstruidas, particularmente las de cuatro niveles, presentan una alta probabilidad de sufrir daños severos bajo eventos sísmicos de 0.45g, alcanzando una probabilidad del 34.54% de daño severo y 17.80% de colapso en condiciones críticas. La ausencia de supervisión técnica y el incumplimiento de normas de construcción son factores determinantes de esta vulnerabilidad.

### **6.3. Metodología de evaluación replicable y rigurosa**

Se desarrolló una metodología robusta que integra análisis estructurales avanzados y modelado de curvas de fragilidad, permitiendo una evaluación cuantitativa de la resiliencia sísmica. Esta metodología es replicable y puede aplicarse a otros contextos con condiciones similares, contribuyendo al diagnóstico estructural en zonas de riesgo sísmico.

### **6.4. Índice de resiliencia sísmica diferenciado por número de niveles**

El índice de resiliencia implementado reveló importantes variaciones según la altura de la vivienda: las edificaciones de dos niveles alcanzaron un 70.3%, mientras que las de cuatro niveles cayeron al 41.6%. Estos resultados evidencian la necesidad de intervenciones técnicas específicas en viviendas más altas y vulnerables.

#### **6.5. Conclusión general del problema y objetivos**

- En respuesta al problema general y a los objetivos de investigación, se concluye que las viviendas autoconstruidas presentan un nivel de resiliencia sísmica insuficiente, siendo más críticas las edificaciones de cuatro niveles. Las diferencias detectadas entre viviendas de distinto diseño estructural reflejan la urgencia de aplicar criterios técnicos y normativos en su construcción y evaluación.

#### **6.6. Conclusiones por Objetivos Específicos**

##### **Objetivo 1: Evaluar la propensión al daño sísmico**

- Se comprobó que las viviendas autoconstruidas, especialmente de cuatro niveles, tienen una alta probabilidad de sufrir daños severos (hasta 34.54%) ante sismos moderados a fuertes, debido a deficiencias estructurales y ausencia de criterios técnicos en el diseño.

##### **Objetivo 2: Analizar el impacto de la autoconstrucción**

- La autoconstrucción, sin supervisión ni normativas, incrementa significativamente la vulnerabilidad estructural. Las viviendas evaluadas mostraron una probabilidad de colapso de hasta 17.80%, resaltando el deterioro en la integridad estructural.

##### **Objetivo 3: Desarrollar una metodología de evaluación**

- Se logró implementar una metodología precisa basada en simulaciones y análisis de fragilidad, que permite cuantificar el grado de resiliencia de forma objetiva y aplicable a distintos tipos de edificaciones autoconstruidas.

#### **Objetivo 4: Establecer un índice de resiliencia sísmica**

- El índice propuesto permitió clasificar y comparar la capacidad de respuesta de viviendas autoconstruidas. Las de dos niveles mostraron mejor desempeño (70.3%) frente a las de cuatro niveles (41.6%), evidenciando zonas críticas que requieren intervención.

#### **6.7. Significancia de la Investigación**

Esta investigación resalta la urgente necesidad de supervisión técnica y el cumplimiento de normativas de construcción en zonas sísmicas. La evidencia obtenida aporta fundamentos sólidos para el diseño de políticas públicas, programas de educación técnica, y estrategias de mitigación de riesgos, enfocados en mejorar la seguridad de las viviendas autoconstruidas vulnerables.

## VII. RECOMENDACIONES

### 7.1. Investigación y Comparación Internacional

- En el contexto de la resiliencia sísmica de viviendas autoconstruidas, se recomienda la realización de estudios longitudinales post-sismo para observar la evolución de la vulnerabilidad y resiliencia de estas estructuras a lo largo del tiempo.
- Sería beneficioso extender estas investigaciones a un ámbito internacional para comparar y adaptar las mejores prácticas de construcción resiliente entre diferentes culturas y geografías.
- Un enfoque en análisis de costo-beneficio específico para técnicas de refuerzo sísmico podría proporcionar datos cruciales para decisiones de política y construcción más informadas.
- Además, la exploración de nuevos materiales y técnicas de construcción, junto con la validación de su eficacia y sostenibilidad, podría revolucionar las prácticas actuales de autoconstrucción en zonas propensas a sismos.

### 7.2. Educación, Tecnología y Modelos Predictivos

- Por otro lado, es imperativo evaluar el impacto de la educación y capacitación en prácticas de construcción segura, no solo inmediatamente después de la intervención, sino también a largo plazo.
- La integración de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el big data en el monitoreo y análisis de la resiliencia de viviendas podría ofrecer insights detallados y proactivos para mitigar riesgos.

- Además, se debería incentivar el desarrollo y validación de modelos predictivos que consideren variables estructurales, materiales y humanas para una evaluación más precisa de la resiliencia.
- Finalmente, es crucial que futuras investigaciones aborden la eficacia de las políticas públicas y marcos regulatorios, y su impacto en la promoción de una construcción más segura y resiliente, extendiendo el enfoque hacia la resiliencia comunitaria para abarcar infraestructura y sistemas de apoyo que mejoren la capacidad de recuperación de comunidades enteras frente a desastres sísmicos.

### **7.3. Recomendaciones específicas para mejorar la resiliencia sísmica de las viviendas autoconstruidas**

#### **☒ Fortalecer la Regulación y Supervisión**

- Implementar y hacer cumplir estrictamente las regulaciones de construcción que aseguren prácticas adecuadas de diseño y construcción sísmica.
- Establecer programas de inspección regulares durante y después de la construcción para asegurar el cumplimiento de las normas sísmicas.

#### **☒ Educación y Capacitación en Construcción Sísmica**

- Desarrollar y promover programas de capacitación dirigidos a constructores locales y propietarios de viviendas sobre técnicas de construcción sísmica segura.
- Incluir módulos educativos en las escuelas y comunidades sobre la importancia de la construcción segura y la preparación para terremotos.

#### **☒ Desarrollo de Materiales de Construcción Accesibles y Resistentes**

- Investigar y promover el uso de materiales de construcción económicos pero eficaces en términos de resistencia sísmica.
- Fomentar la innovación en materiales de construcción locales que cumplan con los estándares sísmicos internacionales.

#### ☒ **Fomentar la Participación Comunitaria en la Reducción del Riesgo Sísmico**

- Establecer programas comunitarios para evaluar y fortalecer las viviendas existentes, especialmente aquellas identificadas como altamente vulnerables.
- Promover la cooperación comunitaria en la implementación de mejoras estructurales y en la respuesta y preparación ante emergencias sísmicas.

#### ☒ **Integración de la Resiliencia Sísmica en la Planificación Urbana**

- Considerar la resiliencia sísmica como un criterio fundamental en la planificación y desarrollo urbano, especialmente en áreas de alto riesgo sísmico.
- Asegurar que la expansión urbana y el desarrollo de nuevas viviendas integren principios de construcción segura y resistente a sismos.

#### ☒ **Desarrollo de un Sistema de Monitoreo y Evaluación Continua**

- Implementar un sistema para monitorear la efectividad de las medidas adoptadas para mejorar la resiliencia sísmica y ajustar las políticas y programas según sea necesario.
- Realizar evaluaciones periódicas de la resiliencia de las estructuras existentes para identificar y abordar las deficiencias antes de que ocurran desastres.

## VIII. REFERENCIAS

- Access, O. (2018). *Incremental Dynamic Analysis of Koyna Dam under Repeated Ground Motions Incremental Dynamic Analysis of Koyna Dam under Repeated Ground Motions*.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/318/1/012021>
- Acevedo, A. B., María, H. S., & Hube, M. A. (2017). *Uso de encuestas digitales remotas para el desarrollo de modelos de exposición sísmica Use of remote digital surveys in the development of seismic exposure models*. May.
- ACI Committee, 318. (2008). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary*.
- Agency, F. E. M. (1997). NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. *Reporte FEMA 273*.
- Agency, F. E. M. (2006). *Techniques for the seismic rehabilitation of existing buildings*. FEMA.
- Ahmad, N., Crowley, H., & Pinho, R. (2011). Analytical fragility functions for reinforced concrete and masonry buildings and building aggregates of Euro-Mediterranean regions. *Department of Structural Mechanics, University of Pavia. WP3-Task, 3*.
- Ahmad, N., Ibrahim, A., & Alam, S. (2019). Analytical Seismic Fragility Curves for Reinforced Concrete Wall pier using Shape Memory Alloys considering maximum drift. *MATEC Web of Conferences*, 258, 04001.  
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201925804001>
- Alas, R., & Grijalva, S. (2018). *Evaluación De La Vulnerabilidad Sísmica , Por Medio De Curvas De Fragilidad , Utilizando El Análisis Dinámico no Lineal incremental*.
- Albuquerque, P. (n.d.). *Seismic vulnerability assessment of medium-rise buildings using the*

*Index Method : the case of block # 22 of Santa Maria Hospital.* 1–19.

- Andrić, J. M., & Lu, D. G. (2017). Fuzzy methods for prediction of seismic resilience of bridges. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, 458–468. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.01.001>
- Antoniou, S., & Pinho, R. (2004). Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(5), 643–661. <https://doi.org/10.1080/13632460409350504>
- Aroquipa, H. (2016). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones en concreto reforzado mediante análisis dinámico no lineal simplificado. *Instname:Universidad de Los Andes*. <http://hdl.handle.net/1992/13900>
- Aroquipa, H. (2019). Evaluation of alternatives of incremental seismic reinforcement for school buildings characteristics in Perú. *XV CONGRESO INTERNACIONAL DE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS*.
- Aroquipa, H. (2022). *Resiliencia de los sistemas estructurales ante eventos sísmicos evaluados mediante las PML y PAE* [Tesis de grado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/6147>
- Aroquipa, H. (2024). *Resistencia sísmica en sistemas estructurales : Análisis mediante PML y PAE* (1st ed.). Fondo Editorial UNAT. <https://doi.org/https://doi.org/10.56224/ediunat.55>
- Aroquipa, H., Hurtado, A., Angel, C., Aroquipa, A., Gamarra, A., & Almeida Del Savio, A. (2023a). A cost-benefit analysis for the appraisal of social and market prices in the probabilistic seismic risk assessment of building portfolios: A methodology for the evaluation of disaster risk reduction programs. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 90(October 2022), 103637. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103637>

- Aroquipa, H., Hurtado, A., Heredia, R., Si-Qi, L., & Angel, C. (2024). Seismic Hazard Assessment Based on Predominance of Local Earthquake Sources: A Methodological Approach Using Psha Applied to the Main Cities in Peru. *Available at SSRN 4766956*.
- Aroquipa, H., & Hurtado, A. I. (2022). Incremental seismic retrofitting for essential facilities using performance objectives: A case study of the 780-PRE school buildings in Peru. *Journal of Building Engineering*, 62, 105387. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105387>
- Aroquipa, H., Hurtado, A., Leon, F., Gamarra, A., Angel, C., Olivera, A., Massa, L. A., & Paz, R. (2023b). Simplified methodological approach for estimating the mean repair time of building portfolios directed to the development of seismic resilience policies, based on the distribution of resources. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(2), 72. <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00321-2>
- Aroquipa, H., Rincon, R., & Fernandez, R. (2017). Evaluación de alternativas de reforzamiento sísmico incremental para edificaciones escolares características en el Perú. *VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 1*.
- Aroquipa, H., & Yamin, L. (2016). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones en concreto reforzado mediante análisis dinámico no lineal simplificado*. Uniandes. <http://hdl.handle.net/1992/13900>
- Asgarian, B., Sadrinezhad, A., & Alanjari, P. (2010). Seismic performance evaluation of steel moment resisting frames through incremental dynamic analysis. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(2), 178–190. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.09.001>
- ATC, S. (1996). Evaluation and retrofit of concrete buildings, Rep. *ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California*.
- Azizan, N. Z. N., Majid, T. A., Nazri, F. M., Maity, D., & Abdullah, J. (2018). Incremental

Dynamic Analysis of Koyna Dam under Repeated Ground Motions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 12021.

Babič, A., & Dolšek, M. (2016). Seismic fragility functions of industrial precast building classes. *Engineering Structures*, 118, 357–370. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.069>

Baker, J. W. (2007). Measuring bias in structural response caused by ground motion scaling. *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, 056, 1–6. <https://doi.org/10.1002/eqe>

Bakhshi, A., & Asadi, P. (2013). Probabilistic evaluation of seismic design parameters of RC frames based on fragility curves. *Scientia Iranica*, 20(2), 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.11.012>

Bal, İ. E., Gülay, F. G., & Tezcan, S. S. (2008). *A New Approach for the Preliminary Seismic Assessment of RC Buildings: P25 Scoring Method*.

Banerjee, A. K., Pramanik, D., & Roy, R. (2016). Seismic structural fragilities: Proposals for improved methodology per spectral matching of accelerogram. *Engineering Structures*, 111, 538–551. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.002>

Banon, H., Irvine, H. M., & Biggs, J. M. (1981). Seismic damage in reinforced concrete frames. *Journal of the Structural Division*, 107(9), 1713–1729.

Barbat, A. H., Mena, U., & Yépez Moya, F. (1998). Evaluación Probabilista Del Riesgo Sísmico En Zonas Urbanas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 14(2), 247–268. <http://www.raco.cat/index.php/RevistaMetodosNumericos/article/viewFile/68897/10146>

Barbat, A. H., & Pujades, L. (1998). Evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en

zonas urbanas. Aplicación a Barcelona. *Calidad Siderúrgica*, 1977.

Barbat, A. H., Vargas, Y. F., Pujades, L. G., & Hurtado, J. E. (2015). Evaluación probabilista del riesgo sísmico de estructuras con base en la degradación de rigidez. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2014.11.001>

Barbat, A. H., Vargas, Y. F., Pujades, L. G., & Hurtado, J. E. (2016). Evaluación probabilista del riesgo sísmico de estructuras con base en la degradación de rigidez. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 32(1), 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2014.11.001>

Batabyal, A. A. (1998). The concept of resilience: retrospect and prospect. *Environment and Development Economics*, 3(2), 235–239.

Batalha, N., Rodrigues, H., & Varum, H. (2019). Seismic performance of RC precast industrial buildings—learning with the past earthquakes. *Innovative Infrastructure Solutions*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0191-y>

Bazzurro, P., & Cornell, C. A. (1994). Seismic hazard analysis of nonlinear structures. I: Methodology. *Journal of Structural Engineering*, 120(11), 3320–3344.

Bazzurro, P., Cornell, C. A., Shome, N., & Carballo, J. E. (1998). Three Proposals for Characterizing MDOF Nonlinear Seismic Response. *Journal of Structural Engineering*, 124(11), 1281–1289. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1998\)124:11\(1281\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1998)124:11(1281))

Becerra, R. (2015). Riesgo sísmico de las edificaciones en la urbanización Horacio Zevallos de Cajamarca-2015. (*Tesis De Pregrado*), 1–92. <http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/7329>

Bedoya-Ruiz, D., Ortiz, G. A., Álvarez, D. A., & Hurtado, J. E. (2015). Modelo dinámico no

- lineal para evaluar el comportamiento sísmico de viviendas de ferrocemento. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 31(3), 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2014.04.001>
- Beilic, D., Casotto, C., Nascimbene, R., Cicola, D., & Rodrigues, D. (2017). Seismic fragility curves of single storey RC precast structures by comparing different Italian codes. *Earthquake and Structures*, 12(3), 359–374. <https://doi.org/10.12989/eas.2017.12.3.359>
- Belejo, A., & Bento, R. (2016). Improved Modal Pushover Analysis in seismic assessment of asymmetric plan buildings under the influence of one and two horizontal components of ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 87, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.04.011>
- Benedetti, D., Benzoni, G., & Parisi, M. A. (1988). Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 16(2), 183–201.
- Benedetti, D., & Petrini, V. (1984). On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure. *L'industria Delle Costruzioni*, 18(149), 66–78.
- Bertero, V. V. (1977). Strength and deformation capacities of buildings under extreme environments. *Structural Engineering and Structural Mechanics*, 53(1), 29–79.
- Blondet, M., Tarque, N., & Velásquez, J. (2006). Seismic risk assessment of informally built confined masonry dwellings in Peru. *Trabajo Presentado En La 13th ECEE y 30th General Assembly of the ESC, Geneva, Switzerland*.
- Bommer, J. J., & Boore, D. M. (2004). Engineering seismology. *Encyclopaedia of Geology*, 499–514.
- Bozorgnia, Y., & Bertero, V. V. (2004). *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering*. CRC press.

- Bracci, J. M., Reinhorn, A. M., Mander, J. B., & Kunnath, S. K. (1989). Deterministic model for seismic damage evaluation of RC structures. *Rep. NCEER-89*, 33.
- Brozovič, M., & Dolšek, M. (2014). Envelope-based pushover analysis procedure for the approximate seismic response analysis of buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(1), 77–96.
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., & Von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, 19(4), 733–752.
- Bruneau, M., Eeri, M., Chang, S. E., Eeri, M., Ronald, T., Eeri, M., Lee, G. C., Eeri, M., Rourke, T. D. O., Eeri, M., Reinhorn, A. M., Eeri, M., Shinozuka, M., Eeri, M., Wallace, W. A., & Winterfeldt, D. Von. (2003). *A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities*. 19(4), 733–752.  
<https://doi.org/10.1193/1.1623497>
- Bruneau, M., & Reinhorn, A. (2007). Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities. *Earthquake Spectra*, 23(1), 41–62.
- Calvi, G. M. (1999). A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 3(03), 411–438.
- Casotto, C., Silva, V., Crowley, H., Nascimbene, R., & Pinho, R. (2015). Seismic fragility of Italian RC precast industrial structures. *Engineering Structures*, 94, 122–136.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.02.034>
- Caverzan, A., & Solomos, G. (2014). Review on resilience in literature and standards for critical built-infrastructure. *EC JRC*, 90900.

- Cheung, M., Foo, S., & Granadino, J. (2000). Seismic retrofit of existing buildings: innovative alternatives. *Public Works and Government ...*, 1–10.  
[http://www.ironwarrior.org/ARE/Lateral\\_Forces/Cheung-M Seismic Retrofits.pdf](http://www.ironwarrior.org/ARE/Lateral_Forces/Cheung-M Seismic Retrofits.pdf)
- Chieffo, N., Mosoarca, M., Formisano, A., & Apostol, I. (2019). Seismic vulnerability assessment and loss estimation of an urban district of Timisoara. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471(10), 102070.
- Chopra, A. K., & Chintanapakdee, C. (2004). Evaluation of modal and FEMA pushover analyses: Vertically “regular” and irregular generic frames. *Earthquake Spectra*, 20(1), 255–271.
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), 561–582. <https://doi.org/10.1002/eqe.144>
- Chung, Y. S., Meyer, C., & Shinozuka, M. (1988). *SARCF User’s Guide: Seismic Analysis of Reinforced Concrete Frames*. National Center for Earthquake Engineering Research.
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A., & Bruneau, M. (2008). *Quantification of Seismic Resilience of Health care facilities*.
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). Seismic resilience of a hospital system. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1–2), 127–144.  
<https://doi.org/10.1080/15732470802663847>
- Cimellaro, P. G., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010a). Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, 32(11), 3639–3649.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.008>
- Cimellaro, P. G., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010b). Framework for analytical

- quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, 32(11), 3639–3649.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.008>
- Colapietro, D., Netti, A., Fiore, A., Fatiguso, F., & Marano, G. C. (2014). *Interventions in r.c. buildings by non-linear static and incremental dynamic analyses*. 8(January 2014), 216–222.
- Corotis, R. B. (2011). Conceptual and analytical differences between resiliency and reliability for seismic hazards. *Structures Congress 2011 - Proceedings of the 2011 Structures Congress*, 2010–2020. [https://doi.org/10.1061/41171\(401\)175](https://doi.org/10.1061/41171(401)175)
- D’Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rossetto, T., Crowley, H., & Silva, V. (2013). Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment - Low/Mid-Rise. *GEM Technical Report*, 08, 162. <https://doi.org/10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.12>
- Davis, I. (1978). Shelter after disaster. In *Shelter after disaster* (p. 127).
- DiPasquale, E., & Cakmak, A. S. (1988). *Identification of the serviceability limit state and detection of seismic structural damage*. National Center for Earthquake Engineering Research New York, NY, USA.
- Dumova Jovanoska, E. (2000). Fragility curves for reinforced concrete structures in Skopje (Macedonia) region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(6), 455–466.
- Eleftheriadou, A. K., Baltzopoulou, A. D., & Karabinis, A. I. (2014). Seismic Risk Assessment of Buildings in the Extended Urban Region of Athens and Comparison with the Repair Cost. *Open Journal of Earthquake Research*, 3(August), 115–134.  
<https://doi.org/10.4236/ojer.2014.33012>
- Fajfar, P. (1999). Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28(9), 979–993.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199909\)28:9<979::AID-EQE850>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199909)28:9<979::AID-EQE850>3.0.CO;2-1)

- Fanaie, N., & Ezzatshoar, S. (2014). Studying the seismic behavior of gate braced frames by incremental dynamic analysis ( IDA ). *JCSR*, 99, 111–120.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.008>
- Farsangi, E. N., Rezvani, F. H., & Talebi, M. (2014). *Seismic Risk Analysis of Steel-MRFs by Means of Fragility Curves in High Seismic Zones*. September.  
<https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.9.1227>
- Farsangi, E. N., & Tasnimi, A. A. (2016). The influence of coupled horizontal–vertical ground excitations on the collapse margins of modern RC-MRFs. *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 8(2), 169–192.
- Farsangi, E. N., Yang, T. Y., & Tasnimi, A. A. (2016). Influence of concurrent horizontal and vertical ground excitations on the collapse margins of non-ductile RC frame buildings. *Structural Engineering and Mechanics*, 59(4), 653–669.
- FEMA. (2008). Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake: Hazus -MH MR5. *Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency*.
- FEMA. (2009). Multihazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS. *Federal Emergency Management Agency*, 718.
- FEMA. (2012). *Next-Generation Methodology for Seismic Performance Assessment of Buildings*. Report No. FEMA P-58. Prepared by the Applied Technology Council (ATC) for the Federal Emergency Management Agency.
- FEMA, F. E. M. A. (1997). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA-273)*.
- FEMA, H. (2003). Multi-hazard loss estimation methodology, earthquake model. *Washington*,

DC, USA: Federal Emergency Management Agency.

FEMA, P. (2000). commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356).

*Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7.*

FEMA, P. (2015). 154: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook. *Federal Emergency Management Agency Report, FEMA. P, 154.*

Finn, W. D. L. (2000). State-of-the-art of geotechnical earthquake engineering practice. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20*(1–4), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00033-6)

Flores, E., Diaz, M., & Zavala, C. (2019). Development of fragility function for typologies of confined masonry dwelling in Metropolitan Lima and Callao cities. *Tecnia, 29*(2), 151–158.

Flores Ortega, R. E. (2015). *Vulnerabilidad, peligro y riesgo sísmico en viviendas autoconstruidas del Distrito de Samegua, Región Moquegua.*

Freeman, S. A. (1978). Prediction of response of concrete buildings to severe earthquake motion. *Special Publication, 55*, 589–606.

Garrido, R. D. U. (2015). *Vulnerabilidad sísmica en edificaciones porticadas compuestas de acero y hormigón armado.* UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.

Giovinazzi, S., & Lagomarsino, S. (2002). A methodology for the vulnerability analysis of built-up areas. *Proceedings of the International Conference on Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction, Bucharest, DVD-Rom.*

Glaister, S., & Pinho, R. (2003). Development of a simplified deformation-based method for seismic vulnerability assessment. *Journal of Earthquake Engineering, 7*(December 2014), 107–140. <https://doi.org/10.1080/13632460309350475>

- Goel, R. K., & Chopra, A. K. (2004a). Evaluation of modal and FEMA pushover analyses: SAC buildings. *Earthquake Spectra*, 20(1), 225–254.
- Goel, R. K., & Chopra, A. K. (2004b). Evaluation of Modal and FEMA Pushover Analyses: SAC Buildings. In *Earthquake Spectra* (Vol. 20, Issue 1, pp. 225–254). <https://doi.org/10.1193/1.1646390>
- Gonzalez, J. L., Roca, P., & Centro Internacional de Metodos Numericos en Ingenieria-CIMNE, B. (Spain); (1998). *Structural analysis of historical construction 2. Possibilities of numerical and experimental techniques*.
- González, V., Alarcón, L. F., Maturana, S., & Bustamante, J. A. (2011). Site Management of Work-in-Process Buffers to Enhance Project Performance Using the Reliable Commitment Model: Case Study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(9), 707–715. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000346](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000346)
- González, V., Alarcón, L. F., Maturana, S., Mundaca, F., & Bustamante, J. (2010). Improving Planning Reliability and Project Performance Using the Reliable Commitment Model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(10), 1129–1139. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000215)
- Gupta, B., & Kunnath, S. K. (2000). Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures. *Earthquake Spectra*, 16(2), 367–392.
- Hajimehrabi, H., Behnamfar, F., Samani, A. K., & Goudarzi, M. A. (2019). Fragility curves for baffled concrete cylindrical liquid-storage tanks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119(January), 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.015>
- Hassan, A. F., & Sozen, M. A. (1997). Seismic vulnerability assessment of low-rise buildings in regions with infrequent earthquakes. *ACI Structural Journal*, 94(1), 31–39.

- Hasselmann, T. K., Eguchi, R. T., & Wiggins, J. H. (1980). Assessment of damageability for existing buildings in a natural hazards environment. Volume 1: Methodology. *Adeb, 1*.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Batista, P. (2010). Metodología de la Investigación.(5ta. Edición). México: Editorial Mc Graw Hill. Campos, W.(2010). *Apuntes de Metodología de La Investigación Científica*.
- Holmes, W. T. (2010). Progress of Seismic Rehabilitation of Buildings in the US. In *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures* (pp. 17–31).
- Hosseinzadeh, S., & Galal, K. (2020). System-level seismic resilience assessment of reinforced masonry shear wall buildings with masonry boundary elements. *Structures, 26*(December 2019), 686–702. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.050>
- Huashua Huarcaya, M., & Sánchez Contreras, A. (2017). *Análisis de la vulnerabilidad sísmica de las viviendas autoconstruidas de la urbanización bella vista de la ciudad de Abancay–Apurímac*.
- Hwang, H. H. M., & Huo, J. R. (1994). Generation of hazard-consistent fragility curves for seismic loss estimation studies. In *Technical Report NCEER* (Vol. 94). US National Center for Earthquake Engineering Research.
- Jalayer, F., De Risi, R., & Manfredi, G. (2015). Bayesian Cloud Analysis: Efficient structural fragility assessment using linear regression. *Bulletin of Earthquake Engineering, 13*(4), 1183–1203. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9692-z>
- Jan, T. S., Liu, M. W., & Kao, Y. C. (2004). An upper-bound pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of high-rise buildings. *Engineering Structures, 26*(1), 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.09.003>
- Johnson, J. L., & Wiechelt, S. A. (2004). Introduction to the special issue on resilience.

*Substance Use & Misuse*, 39(5), 657–670.

- Joyner, M. D., & Sasani, M. (2020). Building performance for earthquake resilience. *Engineering Structures*, 210(April 2019), 110371. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110371>
- Kalkan, E., & Kunnath, S. K. (2006). Adaptive Modal Combination Procedure for Nonlinear Static Analysis of Building Structures. *Journal of Structural Engineering*, 132(11), 1721–1731. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2006\)132:11\(1721\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2006)132:11(1721))
- Kaplan, H. B. (2002). Toward an understanding of resilience. In *Resilience and development* (pp. 17–83). Springer.
- Kassem, M. M., Mohamed Nazri, F., & Noroozinejad Farsangi, E. (2020). The seismic vulnerability assessment methodologies: A state-of-the-art review. In *Ain Shams Engineering Journal* (Issue xxxx). THE AUTHORS. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.04.001>
- Khan, F. Z., Ahmad, M. E., & Ahmad, N. (2021). Shake table testing of confined adobe masonry structures. *Earthquake and Structures*, 20(2), 149–160.
- Khoshnoudian, F., & Kiani, M. (2012). Modified consecutive modal pushover procedure for seismic investigation of one-way asymmetric-plan tall buildings. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 11(2), 221–232. <https://doi.org/10.1007/s11803-012-0112-6>
- Kildashti, K., Mirzadeh, N., & Samali, B. (2018). Thin-Walled Structures Seismic vulnerability assessment of a case study anchored liquid storage tank by considering fixed and flexible base restraints. *Thin Walled Structures*, 123(October 2017), 382–394. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.11.041>

- Kircher, C. A., Nassar, A. A., Kustu, O., & Holmes, W. T. (1997). Development of building damage functions for earthquake loss estimation. *Earthquake Spectra*, 13(4), 663–682.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering* (Pearson Ed). Englewood Cliffs.
- Krawinkler, H. (2002). A general approach to seismic performance assessment. *Proceedings, International Conference on Advances and New Challenges in Earthquake Engineering Research*, 19–20.
- Krawinkler, H., Medina, R., & Alavi, B. (2003). Seismic drift and ductility demands and their dependence on ground motions. *Engineering Structures*, 25(5), 637–653. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00174-8)
- Krawinkler, H., & Seneviratna, G. (1998). Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Engineering Structures*, 20(4), 452–464.
- Kreslin, M., & Fajfar, P. (2012). The extended N2 method considering higher mode effects in both plan and elevation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(2), 695–715.
- Kunnath, S. K., Reinhorn, A. M., & Lobo, R. F. (1992). *IDARC Version 3.0: A program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures*. National Center for Earthquake Engineering Research Buffalo, NY.
- Lagomarsino, S., & Giovinazzi, S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 415–443. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9024-z>
- Leal-Rubio, O. (2017). *Evaluación de vulnerabilidad de viviendas afectadas por hundimientos en función de los tipos de materiales empleados en el pueblo de Jocotepec, Jalisco*.
- Lee, K., & Foutch, D. A. (2002). Seismic performance evaluation of pre-Northridge steel frame buildings with brittle connections. *Journal of Structural Engineering*, 128(4), 546–555.

- Lin, T., & Baker, J. W. (2013). Introducing adaptive incremental dynamic analysis: A new tool for linking ground motion selection and structural response assessment. *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures - Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2013, Icosar*, 805–811.
- Liu, Y., & Kuang, J. S. (2017). Spectrum-based pushover analysis for estimating seismic demand of tall buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(10), 4193–4214.
- Lovon, H., Tarque, N., Silva, V., & Yepes-Estrada, C. (2018). Development of fragility curves for confined masonry buildings in Lima, Peru. *Earthquake Spectra*, 34(3), 1339–1361.
- Manyena, S. B. (2006). The concept of resilience revisited. *Disasters*, 30(4), 434–450.
- Masi, A., & Vona, M. (2012). Vulnerability assessment of gravity-load designed RC buildings: Evaluation of seismic capacity through non-linear dynamic analyses. *Engineering Structures*, 45, 257–269. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.043>
- Medina, A. B. C. (2014). Investigación holística y Desarrollo Instruccional en la comprensión del discurso escrito en estudiantes de educación media de la UEN José Félix Blanco. Caracas. *Revista de Investigación*, 38(81), 69–88.
- Milutinovic, Z. V, & Trendafiloski, G. S. (2003). Risk-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns. *Contract: EVK4-CT-2000-00014, WP4: Vulnerability of Current Buildings*, 1–111.
- Miranda, E. (1999). Approximate seismic lateral deformation demands in multistory buildings. *Journal of Structural Engineering*, 125(4), 417–425.
- Miranda, E. (2001). Estimation of inelastic deformation demands of SDOF systems. *Journal of Structural Engineering*, 127(9), 1005–1012.

- Moazam, A. M., Hasani, N., & Yazdani, M. (2018). Incremental dynamic analysis of small to medium spans plain concrete arch bridges. *Engineering Failure Analysis, 91*, 12–27.
- Moreno González, R. (2006a). Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal: Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona [Universitat Politècnica de Catalunya]. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93559#.X3oLEnWQw0A.mendeley>
- Moreno González, R. (2006b). Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal: Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona [Universitat Politècnica de Catalunya]. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93559#.X3j0e05cgQc.mendeley>
- Moreno, R., Pujades, L., Aparicio, A. C., & Barbat, A. H. (2007). Herramientas necesarias para la evaluación sísmica de edificios. *Monografías de Ingeniería Sísmica, October*, 112. <https://doi.org/10.13140/2.1.1030.6881>
- Mosoarca, M., Onescu, I., Onescu, E., Azap, B., & Chie, N. (2019). *Seismic vulnerability assessment for the historical areas of the Timisoara city , Romania. 101*(March), 86–112. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.013>
- Nazri, F. M., & Saruddin, S. N. A. (2015). Seismic fragility curves for steel and reinforced concrete frames based on near-field and far-field ground motion records. *Arabian Journal for Science and Engineering, 40*(8), 2301–2307.
- Nur, S., Saruddin, A., & Mohamed, F. (2015). Fragility curves for low- and mid-rise buildings in Malaysia. *Procedia Engineering, 125*, 873–878. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.056>
- Ordaz, M., Aguilar, A., & Arboleda, J. (2007). CRISIS, Program for computing seismic hazard. *Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México*.

- Ordaz, M. G., Salgado-Gálvez, M. A., Cardona, O. D., & Contreras, M. (2019). R-CRISIS: 30 años de desarrollos y mejoras continuas encaminadas a una mejor evaluación probabilista del peligro sísmico. *Congreso Nacional de Ingeniería Sísmicas, May*.
- Ordaz, M., & Montoya, C. (2013). Programa de cómputo DEGTRA, V9. 3. *Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Otani, S. (2000). Seismic Vulnerability Assessment Methods for Buildings in Japan. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 2(2), 47–56.
- Özel, A. E., & Güneyisi, E. M. (2011). Effects of eccentric steel bracing systems on seismic fragility curves of mid-rise R/C buildings: A case study. *Structural Safety*, 33(1), 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2010.09.001>
- Ozmen, H. B., Inel, M., Meral, E., & Bucakli, M. (2010). Vulnerability of Low and Mid-Rise Reinforced Concrete Buildings In Turkey. *14Ecee, April 2016*, 1998.
- Parammal Vatteri, A., & D’Ayala, D. (2021). Classification and seismic fragility assessment of confined masonry school buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(5), 2213–2263. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01061-9>
- Park, Y.-J., Ang, A. H.-S., & Wen, Y. K. (1985). Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings. *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 740–757.
- Park, Y. J., Ang, A. H. S., & Wen, Y. K. (1987). Damage-limiting aseismic design of buildings. *Earthquake Spectra*, 3(1), 1–26.
- Peralta Álvarez, (2012). *Análisis estático no lineal y análisis dinámico no lineal del Hospital de Vielha*.
- Perrone, D., Aiello, M. A., Pecce, M., & Rossi, F. (2015). Rapid visual screening for seismic evaluation of RC hospital buildings. *Structures*, 3, 57–70.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.03.002>

- Pinto, P. E., Giannini, R., & Franchin, P. (2007). Seismic Reliability Analysis of Structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(13), 2081–2081. <https://doi.org/10.1002/eqe.742>
- Pnevmatikos, N. G., Papagiannopoulos, G. A., & Papavasileiou, G. S. (2019). Fragility curves for mixed concrete/steel frames subjected to seismic excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116(September 2018), 709–713. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.037>
- Polese, M., Verderame, G. M., Mariniello, C., Iervolino, I., & Manfredi, G. (2008). Vulnerability analysis for gravity load designed RC buildings in Naples - Italy. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(SUPPL. 2), 234–245. <https://doi.org/10.1080/13632460802014147>
- Porter, K. A., & Kiremidjian, A. S. (2000). *Assembly-based vulnerability of buildings and its uses in seismic performance evaluation and risk-management decision-making*. SPA Risk LLC.
- Poursha, M., Khoshnoudian, F., & Moghadam, A. S. (2009). A consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of tall buildings. *Engineering Structures*, 31(2), 591–599. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.10.009>
- Poursha, M., Khoshnoudian, F., & Moghadam, A. S. (2011). A consecutive modal pushover procedure for nonlinear static analysis of one-way unsymmetric-plan tall building structures. *Engineering Structures*, 33(9), 2417–2434. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.013>
- Poursha, M., & Samarin, E. T. (2015). The modified and extended upper-bound (UB) pushover method for the multi-mode pushover analysis of unsymmetric-plan tall buildings. *Soil*

*Dynamics and Earthquake Engineering*, 71, 114–127.

<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.01.012>

- Pujades, L. G., & Barbat, A. H. (2011). *Non-linear static procedures applied to high-rise residential URM buildings. I*, 1–28.
- Rahmani, A. Y., Bourahla, N., Bento, R., & Badaoui, M. (2018). An improved upper-bound pushover procedure for seismic assessment of high-rise moment resisting steel frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(1), 315–339.
- Ramírez Viera, R. R. J. (2018). *Vulnerabilidad sísmica de las viviendas autoconstruidas de albañilería confinada de la ciudad de Recuay-Ancash-2017*.
- Reyes, J. C., & Chopra, A. K. (2012). Modal pushover-based scaling of two components of ground motion records for nonlinear RHA of structures. *Earthquake Spectra*, 28(3), 1243–1267.
- Rezaei Ranjbar, P., & Naderpour, H. (2020). Probabilistic evaluation of seismic resilience for typical vital buildings in terms of vulnerability curves. *Structures*, 23(August 2019), 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.10.017>
- Rinc, I. B. (2011). *Investigación científica e investigación tecnológica como componentes para la innovación: consideraciones técnicas y metodológicas*. 220–255.
- Rossetto, T., & Elnashai, A. (2003). Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Engineering Structures*, 25(10), 1241–1263. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00060-9)
- Rossetto, T., & Elnashai, A. (2005). A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures. *Engineering Structures*, 27(3), 397–409. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.11.002>

- Roufaiel, M. S. L., & Meyer, C. (1987). Analytical modeling of hysteretic behavior of R/C frames. *Journal of Structural Engineering*, 113(3), 429–444.
- Saatcioglu, M., Shoostari, M., & Foo, S. (2013). Seismic screening of buildings based on the 2010 National Building Code of Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(5), 483–498. <https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0055>
- Sadeghi, M., Ghafory-Ashtiany, M., & Pakdel-Lahiji, N. (2015). Developing seismic vulnerability curves for typical Iranian buildings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 229(6), 627–640.
- Salgado-Gálvez, M. A., Carreño, M. L., Barbat, A. H., & Cardona, O. D. (2015). Evaluación probabilista del riesgo sísmico en Lorca mediante simulaciones de escenarios. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2014.12.001>
- Saloustros, S., Pelà, L., Contrafatto, F. R., Roca, P., & Petromichelakis, I. (2019). Vulnerability Assessment of Monumental Masonry Structures Including Uncertainty. In *RILEM Bookseries* (Vol. 18, pp. 1219–1228). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3\\_131](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3_131)
- San Bartolomé, A., Delgado, E., & Quiun, D. (2009). Seismic behavior of a two story model of confined adobe masonry. *Toronto-Ontario, Canada*.
- Selley, R. C., Cocks, R., & Plimer, I. (2004). *Encyclopedia of geology*. Academic Press.
- Senel, S. M., & Kayhan, A. H. (2010). Fragility based damage assesment in existing precast industrial buildings: A case study for Turkey. *Structural Engineering and Mechanics*, 34(1), 39–60. <https://doi.org/10.12989/sem.2010.34.1.039>
- Serdar Kirçil, M., & Polat, Z. (2006). Fragility analysis of mid-rise R/C frame buildings. *Engineering Structures*, 28(9), 1335–1345.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.01.004>

Shamsoddini Motlagh, Z., Raissi Dehkordi, M., Eghbali, M., & Samadian, D. (2020). Evaluation of seismic resilience index for typical RC school buildings considering carbonate corrosion effects. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 46(April 2019), 101511. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101511>

Shome, N. (1999). *Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures*.

Silva González, G. F. (2017). *Riesgo sísmico de las viviendas de albañilería confinada de la urbanización Las Almendras de la ciudad de Jaén*.

Singhal, A., & Kiremidjian, A. S. (1996). *Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage* (pp. 122(12), 1459–1467). *Journal of Structural Engineering*. [https://doi.org/10.1163/\\_q3\\_SIM\\_00374](https://doi.org/10.1163/_q3_SIM_00374)

Singhal, A., Kiremidjian, A. S. (1996). Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage. *Journal of Structural Engineering*, 122(12), 1459–1467.

Solomos, G., & Caverzan, A. (2014). *Review on resilience in literature and standards for critical built-infrastructure*. <https://doi.org/10.2788/872668>

Taboada, D., Chiroque, J., Crisanto, L., Acuña, E., & Gonzales, I. (2018). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN HOSPITAL AISLADO SÍSMICAMENTE EMPLEANDO MÉTODOS DE RESILIENCIA SÍSMICA* (C. de I. del P. C. N. 12° S. I. en G. del R. de D. 12th I. S. in D. R. Management (ed.); pp. 114–116). CIP - Lima. <http://www.cip.org.pe/publicaciones/2019/memorias-simposio-grd-2018-detalle.pdf>

Tang, W. H., Ang, A. (2007). *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil & Environmental Engineering*. Wiley.

Tarque, N., & Pancca-Calsin, E. (2022). Building constructions characteristics and mechanical

- properties of confined masonry walls in San Miguel (Puno-Peru). *Journal of Building Engineering*, 45, 103540. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103540>
- Terremoti, C. N. R. G. N. D. (1993). *Rischio sismico di edifici pubblici Parte II Risultati per la regione Emilia-Romagna*. CNR Gruppo Nazionale Difesa Terremoti, Roma.
- Tirca, L., Serban, O., Lin, L., Wang, M., & Lin, N. (2016). Improving the Seismic Resilience of Existing Braced-Frame Office Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 142(8), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001302](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001302)
- Turner, J. F. C. (1976). Housing by people: Towards autonomy in building environments. (*No Title*).
- Vamvatsikos, D., & Allin Cornell, C. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), 491–514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- Vamvatsikos, D., & Cornell, A. (2006). Incremental dynamic analysis with two components of motion for a 3D steel structure. *Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering*.
- Van der Leeuw, S. E., & Aschan-Leygonie, C. (2005). A long-term perspective on resilience in socio-natural systems. *Micro-Meso-Macro: Addressing Complex Systems Couplings, London, World Scientific*, 227–264.
- Vargas Alzate, Y. F. (2013). *Análisis estructural estático y dinámico probabilista de edificios de hormigón armado. Aspectos metodológicos y aplicaciones a la evaluación del daño*.
- Vargas, Y. (2013). *Análisis estructural estático y dinámico probabilista de edificios de hormigón armado*. 203.
- Vargas, Y. F., Pujades, L. G., Barbat, A. H., & Hurtado, J. E. (2013). Evaluación probabilista de la capacidad, fragilidad y daño sísmico de edificios de hormigón armado. *Revista*

- Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 29(2), 63–78. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.04.003>
- Vickers, M. H., & Kouzmin, A. (2001). ‘Resilience’ in organizational actors and rearticulating ‘voice’: towards a humanistic critique of new public management. *Public Management Review*, 3(1), 95–119.
- 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.
- Viteri, N. C. (2012). LA INVESTIGACIÓN MIXTA, ESTRATEGIA ANDRAGÓGICA FUNDAMENTAL PARA FORTALECER LAS CAPACIDADES INTELECTUALES SUPERIORES. *REVISTA CIENTÍFICA VOL 2, NÚMERO 2, AGOSTO DE 2012*.
- Wallace, N. M., & Miller, T. H. (2008). Seismic screening of public facilities in Oregon’s western counties. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13(4), 189–197.
- Waller, M. A. (2001). Resilience in ecosystemic context: Evolution of the concept. *American Journal of Orthopsychiatry*, 71(3), 290–297.
- Yacila, J., Salsavilca, J., Tarque, N., & Camata, G. (2019). Experimental assessment of confined masonry walls retrofitted with SRG under lateral cyclic loads. *Engineering Structures*, 199(April), 109555. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109555>
- Yamin, L. (2015). *Building Seismic Risk in Terms of Economic Losses By Integration of Components Repair Costs*.
- Yamin, L., Hurtado, A., Rincon, R., Barbat, A. H., & Reyes, J. (2014). Use of Non-Linear Dynamic Analysis in the Assessment of Seismic Vulnerability of Buildings. *Second*

*European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 1–9.

- Yamin, L., Hurtado, A., Rincon, R., Dorado, J., & Reyes, J. (2017). Probabilistic seismic vulnerability assessment of buildings in terms of economic losses. *Engineering Structures*, 138, 308–323. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.013>
- Yamín Lacouture, L. E. (2016). Riesgo sísmico de edificaciones en términos de pérdidas económicas mediante integración de costos de reparación de componentes [Universitat Politècnica de Catalunya]. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/96210#.X3j02iq6JR0.mendeley>
- Yépez, F., Barbat, H. A., & Canas, J. A. (1996). *Evaluación probabilista de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras de hormigón armado por medio de simulación* [Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)]. <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/27736>
- Yun, S., Hamburger, R. O., Cornell, C. A., & Foutch, D. A. (2002). Seismic Performance Evaluation for Steel Moment Frames. *Journal of Structural Engineering*, 128(4), 534–545. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2002\)128:4\(534\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2002)128:4(534))
- Zhang, J. Z., Jiang, J., & Li, G. Q. (2017). An improved consecutive modal pushover procedure for estimating seismic demands of multi-storey framed buildings. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(4). <https://doi.org/10.1002/tal.1336>

**IX. ANEXOS**

## Anexo 1: Matriz de consistencia

Título: RESILIENCIA DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES ANTE EVENTOS SÍSMICOS EVALUADOS MEDIANTE LAS PML Y PAE

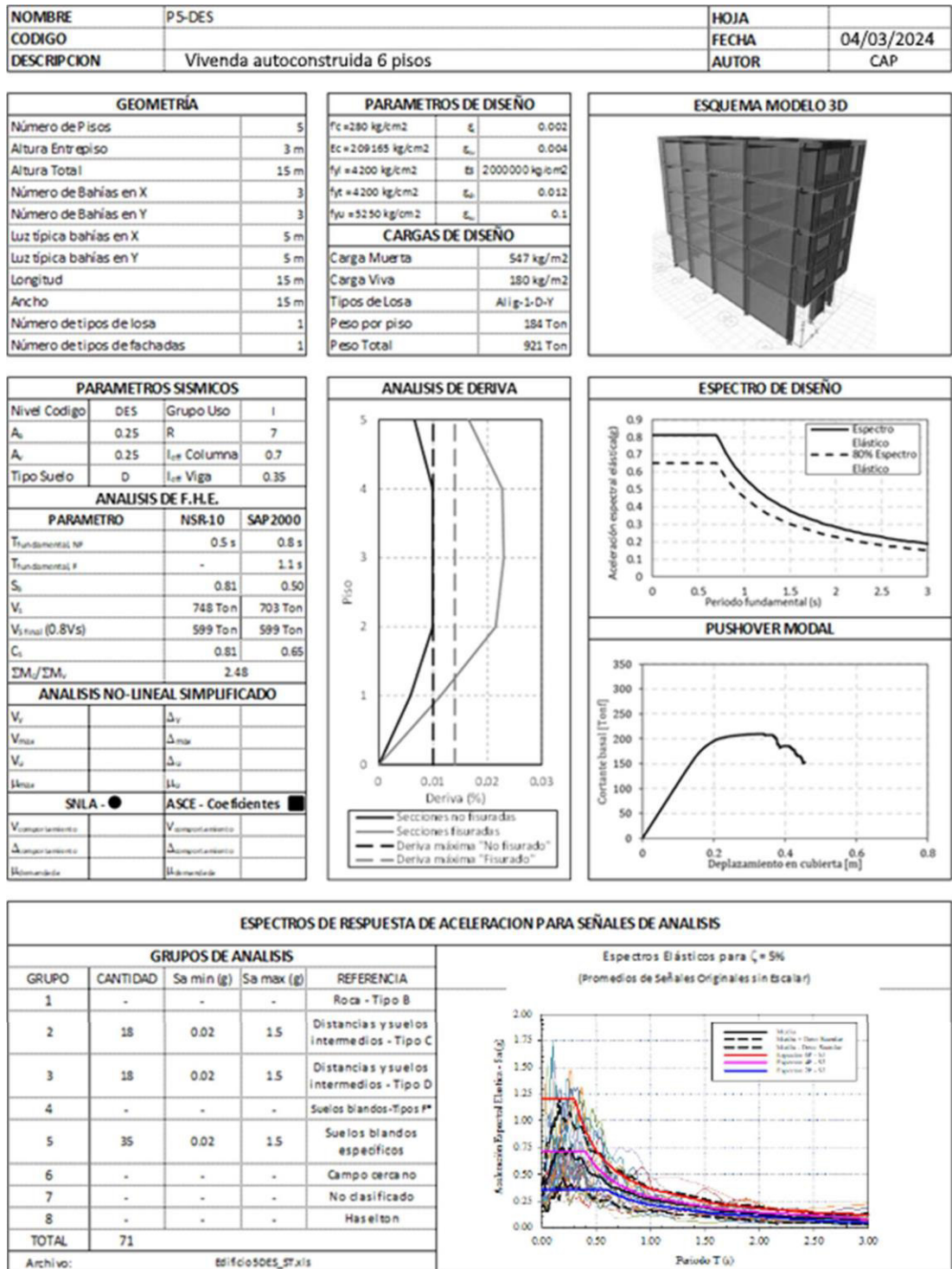
Hipótesis	Variable	Indicadores	Descripción	Dimensión tipo-función	Escala	Nivel
<b>H - Principal</b>	Resiliencia sísmica	Funcionalidad	Mide la capacidad del sistema para continuar operando post-sismo	Log-normal o Beta	Continua y creciente con el estado de daño relación Intensidad	Baja, Media, Moderada, Alta
		Costo de reposición y reparación	Estima los costes económicos para reparar o reemplazar estructuras	Log-normal o Beta		
		Tiempos de reposición y reparación	Tiempo requerido para reparar o reemplazar elementos dañados	Log-normal o Beta		
<b>H1 – Secundaria</b>	Vulnerabilidad	Intensidad sísmica (parámetros de intensidad)	Evalúa la severidad del sismo y su impacto en las estructuras	Log-normal o Beta	Continua y creciente con el estado de daño relación Intensidad - IDA	Baja, Media, Moderada, Alta, Colapso
		Desempeño sísmico (Rigidez, Resistencia, ductilidad)	Analiza cómo las estructuras soportan y deforman durante un sismo	Log-normal o Beta		
		Incertidumbres en las señales sísmicas	Mide las variabilidades en la predicción de respuesta sísmica	Log-normal o Beta		
<b>H2 – Secundaria</b>	Estado de Daño	Grado de fisuración	Evalúa la severidad de los daños estructurales visibles	Log-normal	Discreta entre estados de daño	Leve, Moderado, Severo, Completo
		Función de fragilidad	Probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño dado	Log-normal		
		Incertidumbre en la función de fragilidad	Variabilidad en la estimación de la función de fragilidad	Log-normal		
<b>H3 – Secundaria</b>	Parámetros de Demanda sísmica	Derivas máximas de entrepiso	Mide las deformaciones verticales máximas durante un sismo	Log-normal	Continua y creciente con la intensidad sísmica	IDA, Espectro de capacidad, Espectro de demanda, Parámetros sismos
		Aceleración absoluta máxima en pisos	Evalúa las aceleraciones máximas experimentadas en los pisos	Log-normal		
		Rotaciones inelásticas en rótulas plásticas	Mide las deformaciones permanentes en conexiones críticas	Log-normal		
		Fuerzas cortantes máximas en elementos	Evalúa las fuerzas máximas soportadas por elementos estructurales	Log-normal		
		Deriva residual	Analiza la deformación permanente post-sismo de las estructuras	Log-normal		
		Incertidumbres de PDS	Estudia la variabilidad en la predicción de la demanda sísmica	Log-normal		

Fuente: Elaboración Propia.

## Anexo 2: Registro sísmico

ID	Año	Evento	Estación	Magnitud (Ms)	D5-75 (s)	D5-95 (s)	Ia (m / s)	Vs (m / s)	Frecuencia (Hz)
57	1971	San Fernando	Ruta Castaic - Old Ridge	6.61	10,6	16,8	1	450,28	0.375
88	1971	San Fernando	Presa Santa Felita (Outlet)	6.61	7.4	23,6	0,2	389,0	0,125
164	1979	Imperial Valley-06	Cerro Prieto	6.53	19,7	36,4	1.3	471,53	0.1125
286	1980	Irpinia, Italia-01	Bisaccia	6,9	16,8	27,0	0,2	496,46	0,15
4841	2007	Chuetsu-oki, Japón	Joetsu Yasuzukaku Yasuzuka	6,8	7.1	15,8	0,7	655,45	0,05
290	1980	Irpinia, Italia-01	Mercato San Severino	6,9	14.3	26,7	0,5	428,57	0,625
313	1981	Corinto, Grecia	Corinto	6.6	5.4	15,4	0,9	361,4	0,25
755	1989	Loma Prieta	Presa Coyote Lake - Pilar suroeste	6,93	6	15,7	1,5	561,43	0.1625
827	1992	Cabo Mendocino	Fortuna - Fortuna Blvd	7.01	11,3	18,7	0,3	457.06	0.35
830	1992	Cabo Mendocino	Aeropuerto de Shelter Cove	7.01	14,8	17,5	0,6	518,98	0,5
881	1992	Landers	Estación de Bomberos de Morongo Valley	7.28	19,1	31,9	1.2	396,41	0,25
1083	1994	Northridge-01	Sunland - Mt Gleason Ave	6,69	6,8	15,9	0,5	402.16	0,125
1614	1999	Duzce, Turquía	Lamont 1061	7.14	9,7	15,5	0,2	481,0	0.0875
1616	1999	Duzce, Turquía	Lamont 362	7.14	14,6	20,5	0	517,0	0,075
1633	1990	Manjil, Irán	Abbar	7.37	10,8	29,1	7.5	723,95	0,13
3750	1992	Cabo Mendocino	Estación de Bomberos de Loleta	7.01	8	15,3	0,9	515,65	0.0625
3753	1992	Landers	Fun Valley	7.28	22,7	29,6	1.2	388,63	0.0625
3757	1992	Landers	Estación de bomberos de North Palm Springs # 36	7.28	25,0	35,9	0,7	367,84	0.1125
3759	1992	Landers	Granja de truchas de aguas bravas	7.28	23,2	33,4	0,6	425.02	0.375
3907	2000	Tottori, Japón	OKY004	6.61	5.7	15,9	7.2	475,8	0.375
3926	2000	Tottori, Japón	OKYH08	6.61	13,2	25,4	0,6	694.21	0.0375
4013	2003	San Simeon, CA	Presa de San Antonio - Dedo del pie	6.52	8.7	18,8	0,2	509.04	0,25
	1974	Lima	Estación Zarate	6.1	8.2	17.2	0,8	457,14	0,06
	2007	ICA	Única	7	10.1	14.1	1	302.56	0.214
	1970	Lima	Parque de la Reserva	6.6	8.1	17.35	0,6	198.67	0.167
	1966	Lima Callao	Parque de la Reserva	8.1	12.8	22.97	1.2	350.56	0.27

Anexo 3. formato de parámetros básicos de cada prototipo de análisis



Fuente: Elaboración propia

**Procedimiento para la recolección de datos.**

- a) Curva de empuje horizontal (“*pushover*”): cortante máximo en la base,  $V(Ton)$ , vs. desplazamiento máximo de cubierta  $\Delta_{cubierta}$  cm.
- b) Curva de empuje horizontal normalizada (“*pushover*”): cortante máximo en la base normalizada con el peso del edificio,  $V/W$ , vs. deriva máxima de cubierta,  $D_{cubierta}$  (%).
- c) Curva de análisis dinámico incremental, *ADI* (*IDA* de las siglas en inglés de “dynamic incremental análisis”): deriva máxima de cubierta en %,  $D_{cubierta}$  (%) vs. intensidad sísmica,  $Sa(T_1)$  (g).
- d) Deriva de entrepiso,  $D_p$ (%) vs. intensidad sísmica,  $Sa(T_1)$  (g).
- e) Índices de sobreesfuerzo a cortante en columnas y vigas en nudos  $i$  y  $j$ ,  $I_{sc}$  vs. intensidad sísmica,  $Sa(T_1)$  (g). El índice de sobreesfuerzo a cortante se calcula como el esfuerzo cortante máximo actuante en cada elemento y en cada análisis dividido por la capacidad a cortante de la sección (para estructuras tipo *DES* se considera únicamente la participación del acero de refuerzo y se desprecia en su totalidad la participación del concreto) y tiene como propósito verificar si ocurre o no falla de corte en los elementos previamente a que la sección alcance la capacidad máxima por rotación.
- f) Deriva residual máxima,  $D_r$ (%) vs. intensidad sísmica,  $Sa(T_1)$  (g). La deriva residual máxima corresponde a la mayor de las derivas residuales de los diferentes entrepisos una vez se completa la duración de la señal de análisis y solo se registra cuando la edificación sale del rango elástico para cada los diferentes incrementos en la intensidad sísmica considerados.





MUY PRONUNCIADO	PRONUNCIADO	MODERADO	PLANA O LIGERA
1. Mayor a 45% ( )	2. Entre 45% a 20% ( )	3. Entre 20% a 10% (X)	4. Hasta 10% ( )
5. CANTIDAD DE PISOS   2			
6. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA		1. Irregular (X)	2. Regular ( )
7. CONFIGURACIÓN DE ELEVACIÓN		1. Irregular ( )	2. Regular (X)
8. JUNTAS DE DILATACIÓN		1. Si existen ( )	2. No existen (X)
9. EN LOS PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES SE OBSERVA			
No existen / son precarios	Deterioro y/o humedad	Regular estado	Buen estado
1. Cimentación ( )	1. Cimentación ( )	1. Cimentación ( )	1. Cimentación ( )
2. Columnas ( )	2. Columnas (X)	2. Columnas ( )	2. Columnas ( )
3. Muros portantes ( )	3. Muros portantes (X)	3. Muros portantes ( )	3. Muros portantes ( )
4. Vigas ( )	4. Vigas (X)	4. Vigas ( )	4. Vigas ( )
5. Techos ( )	5. Techos (X)	5. Techos ( )	5. Techos ( )

VIVIENDA N°022		
A. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA VIVIENDA		
1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	2. UBICACIÓN EN EL DISTRITO	3. FECHA
1. Departamento: Lima	1. Zona: Uyanmarca - Pampas de SJ	dd:
2. Provincia: Lima	2. Manzana: H	mm:
3. Distrito: San Juan de Miraflores	3. Lote: 37	aa:
4. DIRECCIÓN DE VIVIENDA: Calle 3		
5. NOMBRES Y APELLIDOS DEL ENTREVISTADO(A)		
Nombres: Fausto		Apellido Materno: Flores
Apellido Paterno: Jamarca		DNI:

B. CARACTERÍSTICAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA VIVIENDA			
1. LA EDIFICACIÓN CONTÓ CON LA PARTICIPACIÓN DE UN INGENIERO CIVIL EN EL DISEÑO Y/O CONSTRUCCIÓN			
1. No (X)	2. Solo construcción ( )	3. Solo diseño ( )	4. Sí, totalmente ( )
2. ANTIGÜEDAD DE LA EDIFICACIÓN			
1. Más de 50 años ( )	2. De 20 a 49 años (X)	3. De 3 a 19 años ( )	4. De 0 a 2 años ( )
3. TIPOS DE SUELOS			
1. Suelos Muy rígidos ( )	2. Suelos intermedios ( )	3. Suelos blandos (X)	
4. TOPOGRAFÍA DEL TERRENO DE LA VIVIENDA			
MUY PRONUNCIADO	PRONUNCIADO	MODERADO	PLANA O LIGERA
1. Mayor a 45% ( )	2. Entre 45% a 20% ( )	3. Entre 20% a 10% (X)	4. Hasta 10% ( )
5. CANTIDAD DE PISOS   3			
6. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA		1. Irregular ( )	2. Regular (X)
7. CONFIGURACIÓN DE ELEVACIÓN		1. Irregular ( )	2. Regular (X)
8. JUNTAS DE DILATACIÓN		1. Si existen ( )	2. No existen (X)
9. EN LOS PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES SE OBSERVA			
No existen / son precarios	Deterioro y/o humedad	Regular estado	Buen estado
1. Cimentación ( )	1. Cimentación ( )	1. Cimentación ( )	1. Cimentación ( )
2. Columnas ( )	2. Columnas (X)	2. Columnas ( )	2. Columnas ( )
3. Muros portantes ( )	3. Muros portantes (X)	3. Muros portantes ( )	3. Muros portantes ( )
4. Vigas ( )	4. Vigas (X)	4. Vigas ( )	4. Vigas ( )
5. Techos ( )	5. Techos (X)	5. Techos ( )	5. Techos ( )

VIVIENDA N°023		
A. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA VIVIENDA		
1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	2. UBICACIÓN EN EL DISTRITO	3. FECHA
1. Departamento: Lima	1. Zona: Uyanmarca - Pampas de SJ	dd:
2. Provincia: Lima	2. Manzana: A	mm:
3. Distrito: San Juan de Miraflores	3. Lote: 10	aa:
4. DIRECCIÓN DE VIVIENDA: Calle Clavelles		
5. NOMBRES Y APELLIDOS DEL ENTREVISTADO(A)		
Nombres: Erick		Apellido Materno: Colvo
Apellido Paterno: Brancano		DNI:

B. CARACTERÍSTICAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA VIVIENDA			
1. LA EDIFICACIÓN CONTÓ CON LA PARTICIPACIÓN DE UN INGENIERO CIVIL EN EL DISEÑO Y/O CONSTRUCCIÓN			
1. No <input checked="" type="checkbox"/>	2. Solo construcción <input type="checkbox"/>	3. Solo diseño <input type="checkbox"/>	4. Sí, totalmente <input type="checkbox"/>
2. ANTIGUEDAD DE LA EDIFICACIÓN			
1. Más de 50 años <input type="checkbox"/>	2. De 20 a 49 años <input type="checkbox"/>	3. De 3 a 19 años <input checked="" type="checkbox"/>	4. De 0 a 2 años <input type="checkbox"/>
3. TIPOS DE SUELOS			
1. Suelos Muy rígidos <input type="checkbox"/>	2. Suelos intermedios <input type="checkbox"/>	3. Suelos blandos <input checked="" type="checkbox"/>	
4. TOPOGRAFÍA DEL TERRENO DE LA VIVIENDA			
MUY PRONUNCIADO	PRONUNCIADO	MODERADO	PLANA O LIGERA
1. Mayor a 45% <input type="checkbox"/>	2. Entre 45% a 20% <input type="checkbox"/>	3. Entre 20% a 10% <input checked="" type="checkbox"/>	4. Hasta 10% <input type="checkbox"/>
5. CANTIDAD DE PISOS	2		
6. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA		1. Irregular <input type="checkbox"/>	2. Regular <input checked="" type="checkbox"/>
7. CONFIGURACIÓN DE ELEVACIÓN		1. Irregular <input type="checkbox"/>	2. Regular <input checked="" type="checkbox"/>
8. JUNTAS DE DILATACIÓN		1. Si existen <input type="checkbox"/>	2. No existen <input checked="" type="checkbox"/>
9. EN LOS PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES SE OBSERVA			
No existen / son precarios	Deterioro y/o humedad	Regular estado	Buen estado
1. Cimentación <input type="checkbox"/>	1. Cimentación <input type="checkbox"/>	1. Cimentación <input type="checkbox"/>	1. Cimentación <input type="checkbox"/>
2. Columnas <input type="checkbox"/>	2. Columnas <input checked="" type="checkbox"/>	2. Columnas <input type="checkbox"/>	2. Columnas <input type="checkbox"/>
3. Muros portantes <input type="checkbox"/>	3. Muros portantes <input checked="" type="checkbox"/>	3. Muros portantes <input type="checkbox"/>	3. Muros portantes <input type="checkbox"/>
4. Vigas <input type="checkbox"/>	4. Vigas <input checked="" type="checkbox"/>	4. Vigas <input type="checkbox"/>	4. Vigas <input type="checkbox"/>
5. Techos <input type="checkbox"/>	5. Techos <input checked="" type="checkbox"/>	5. Techos <input type="checkbox"/>	5. Techos <input type="checkbox"/>

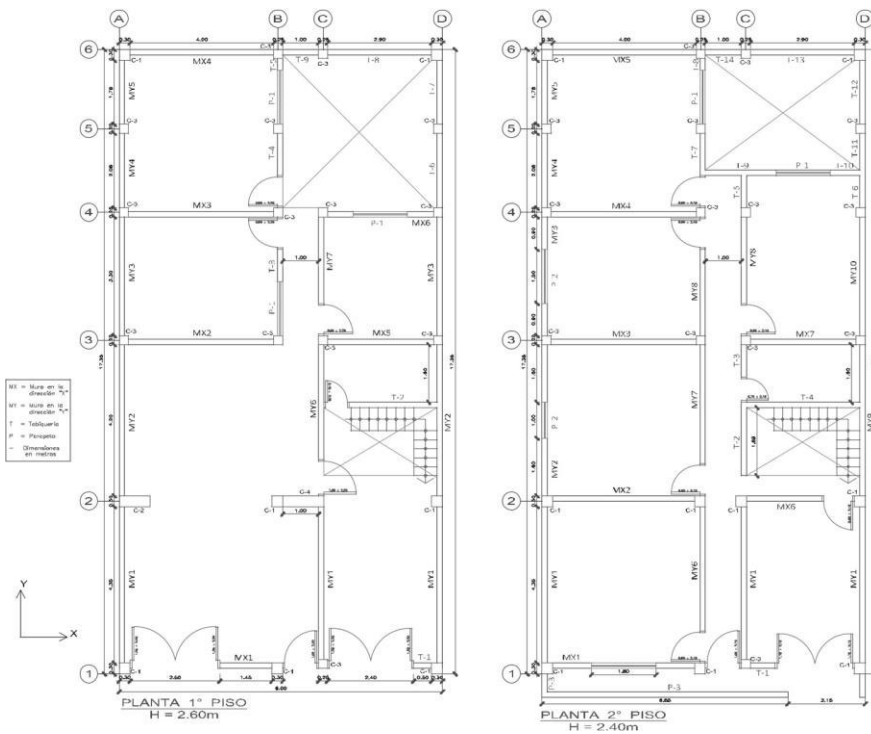
VIVIENDA N°024		
A. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA VIVIENDA		
1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	2. UBICACIÓN EN EL DISTRITO	3. FECHA
1. Departamento: <u>Lima</u>	1. Zona: <u>Urbanmarca - Pampas de SJ</u>	dd:
2. Provincia: <u>Lima</u>	2. Manzana: <u>D</u>	mm:
3. Distrito: <u>San Juan de Miraflores</u>	3. Lote: <u>6</u>	aa:
4. DIRECCIÓN DE VIVIENDA: <u>Calle Girasoles</u>		
5. NOMBRES Y APELLIDOS DEL ENTREVISTADO(A)		
Nombres: <u>Genaro</u>		Apellido Materno: <u>Mendoza</u>
Apellido Paterno: <u>Perez</u>		DNI:

B. CARACTERÍSTICAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA VIVIENDA			
1. LA EDIFICACIÓN CONTÓ CON LA PARTICIPACIÓN DE UN INGENIERO CIVIL EN EL DISEÑO Y/O CONSTRUCCIÓN			
1. No <input type="checkbox"/>	2. Solo construcción <input type="checkbox"/>	3. Solo diseño <input checked="" type="checkbox"/>	4. Sí, totalmente <input type="checkbox"/>
2. ANTIGUEDAD DE LA EDIFICACIÓN			
1. Más de 50 años <input type="checkbox"/>	2. De 20 a 49 años <input checked="" type="checkbox"/>	3. De 3 a 19 años <input type="checkbox"/>	4. De 0 a 2 años <input type="checkbox"/>
3. TIPOS DE SUELOS			
1. Suelos Muy rígidos <input type="checkbox"/>	2. Suelos intermedios <input type="checkbox"/>	3. Suelos blandos <input checked="" type="checkbox"/>	
4. TOPOGRAFÍA DEL TERRENO DE LA VIVIENDA			
MUY PRONUNCIADO	PRONUNCIADO	MODERADO	PLANA O LIGERA
1. Mayor a 45% <input type="checkbox"/>	2. Entre 45% a 20% <input checked="" type="checkbox"/>	3. Entre 20% a 10% <input type="checkbox"/>	4. Hasta 10% <input type="checkbox"/>
5. CANTIDAD DE PISOS	2		
6. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA		1. Irregular <input checked="" type="checkbox"/>	2. Regular <input type="checkbox"/>
7. CONFIGURACIÓN DE ELEVACIÓN		1. Irregular <input type="checkbox"/>	2. Regular <input checked="" type="checkbox"/>
8. JUNTAS DE DILATACIÓN		1. Si existen <input type="checkbox"/>	2. No existen <input checked="" type="checkbox"/>
9. EN LOS PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES SE OBSERVA			
No existen / son precarios	Deterioro y/o humedad	Regular estado	Buen estado
1. Cimentación <input type="checkbox"/>	1. Cimentación <input type="checkbox"/>	1. Cimentación <input type="checkbox"/>	1. Cimentación <input type="checkbox"/>
2. Columnas <input type="checkbox"/>	2. Columnas <input checked="" type="checkbox"/>	2. Columnas <input type="checkbox"/>	2. Columnas <input type="checkbox"/>
3. Muros portantes <input type="checkbox"/>	3. Muros portantes <input checked="" type="checkbox"/>	3. Muros portantes <input type="checkbox"/>	3. Muros portantes <input type="checkbox"/>
4. Vigas <input type="checkbox"/>	4. Vigas <input checked="" type="checkbox"/>	4. Vigas <input type="checkbox"/>	4. Vigas <input type="checkbox"/>
5. Techos <input type="checkbox"/>	5. Techos <input checked="" type="checkbox"/>	5. Techos <input type="checkbox"/>	5. Techos <input type="checkbox"/>

VIVIENDA N°025
----------------

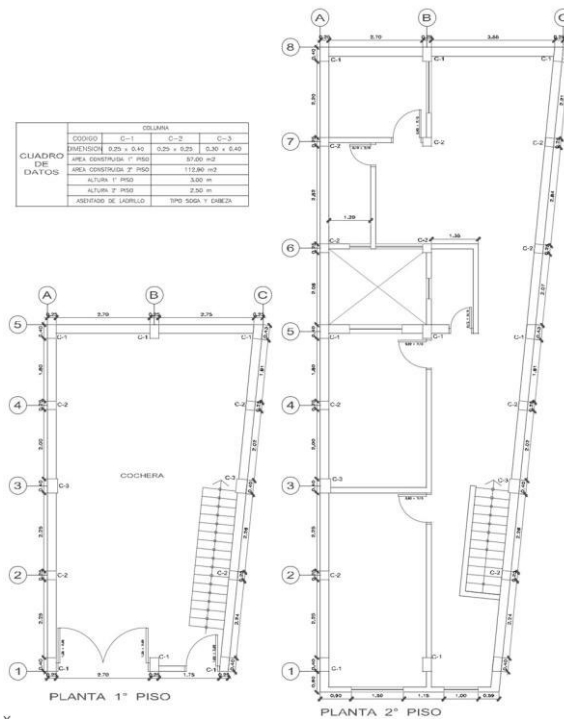
FICHA DE ENCUESTA								
Encuesta de la vivienda N° 01								
Zona:	Pampas de SJ		Fecha:	01/05/24	Hora:	11:03 am		
Dirección:	Av. Juan Velasco Alvarado		Manzana:	D	Lote:	10		
1. Estado actual de la vivienda: En construcción								
2. ¿Qué tiempo viene realizándose la obra?			1 mes					
3. ¿La construcción cuenta con planos?			No					
4. ¿Cuenta con estudios sobre construcción de edificaciones?			Sí					
5. ¿Cuánto tiempo viene laborando en construcción?			5 años					
6. ¿Qué tipo de ladrillos están usando o usaron en la construcción?			Arcilla					
¿Para qué pisos?			Observaciones:					
Pandereta	2 y 3	Lark						
KK 18 huecos	1	Lark						
Máscico	-							
Ladrillo de techo	1, 2 y 3	Lark						
7. Presencia de juntas en la vivienda:			No					
8. ¿Qué marca de cemento y acero utilizan? Cemento:			Sol	Acero:	Arcapisa			
9. Características de elementos estructurales de la vivienda:								
Dimensiones		Und	Medidas	Cimiento corrido	Zapatas	Columnas	Vigas	Losa
Largo	cm		70	60	40			
Ancho	cm		50	60	15		25	
Altura	cm		50	40			20	20
Dosificación		Und.	Cantidad					
Cemento	bols		6.5	7	8	8	8	8
Água	m <sup>3</sup>		0.190	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185
Arena fina	m <sup>3</sup>							
Arena gruesa	m <sup>3</sup>		0.49	0.50	0.54	0.54	0.54	0.54
Piedra	m <sup>3</sup>			0.55	0.58	0.58	0.58	0.58
Acero		Und.	Cantidad					
Longitud				50	4 varillas 1/2"	4 varillas 1/2"	4 varillas 1/2"	Vigueta
				50	4 varillas 1/2"	4 varillas 1/2"	4 varillas 1/2"	Sup. 1/4"
								Inf. 1/2"
								Bas. 1/2"
								Temperatura
								1/4" @ 0.25
Estribos								

10. Boceto de la vivienda



FICHA DE ENCUESTA							
Encuesta de la vivienda N° 02							
Zona:	Pampas de SJ		Fecha:	06/05/24	Hora:	10:00 a.m.	
Dirección:	Dr. Juan Velasco Alvarado		Manzana:	B	Lote:	15	
1. Estado actual de la vivienda: En construcción							
2. ¿Qué tiempo viene realizándose la obra?			2 meses				
3. ¿La construcción cuenta con planos?			Sí				
4. ¿Cuenta con estudios sobre construcción de edificaciones?			No				
5. ¿Cuánto tiempo viene laborando en construcción?			10 años				
6. ¿Qué tipo de ladrillos están usando o usaron en la construcción?			Arcilla				
	¿Para qué pisos?	Marca	Observaciones:				
Pandereta	2 y 3	Piramide					
KK 18 huecos	1	Piramide					
Macizo	-						
Ladrillo de techo	1, 2 y 3	Piramide					
7. Presencia de juntas en la vivienda: No							
8. ¿Qué marca de cemento y acero utilizan? Cemento:			Sol		Acero: Arcoquina		
9. Características de elementos estructurales de la vivienda:							
			Cimiento corrido	Zapatas	Columnas	Vigas	Losa
Dimensiones	Und	Medidas					
Largo	cm		60	60	25		
Ancho	cm		60	60	25	25	
Altura	cm		30	50		25	25
Dosificación	Und.	Cantidad					
Cemento	bls		5	6	7	7	7
Agua	m <sup>3</sup>		0.180	0.193	0.195	0.185	0.185
Arena fina	m <sup>3</sup>						
Arena gruesa	m <sup>3</sup>		0.50	0.60	0.58	0.56	0.58
Piedra	m <sup>3</sup>			0.68	0.61	0.61	0.61
Acero	Und.	Cantidad					
Longitud				50	4 varillas 1/2"	4 varillas 1/2"	Vigueta
				40	4 varillas 1/2"	4 varillas 1/2"	Sup. 1/2"
							Inf. 1/2"
							Base 1/2"
							Temperatura
							V+(-) 0.25
Estribos:					Ø 0.0 v @ 0.20		

10. Boceto de la vivienda



Anexo 5. Resistencia a la compresión del concreto ( $F'c$  [kg/cm<sup>2</sup>])

N <sup>a</sup>	N° Pisos	Columnas	Vigas	Losas	N <sup>a</sup>	N° Pisos	Columnas	Vigas	Losas
1	2-P	169	144	144	61	4-P	153	150	166
2	2-P	170	185	185	62	4-P	150	156	156
3	2-P	141	155	155	63	4-P	178	138	138
4	2-P	157	137	137	64	4-P	168	166	166
5	2-P	163	186	186	65	4-P	138	141	141
6	2-P	151	148	148	66	4-P	138	152	152
7	2-P	159	141	141	67	4-P	138	136	136
8	2-P	160	176	180	68	4-P	155	138	138
9	2-P	161	145	145	69	4-P	140	179	179
10	2-P	165	181	181	70	4-P	137	137	137
11	2-P	152	170	170	71	4-P	173	175	175
12	2-P	136	153	153	72	4-P	154	187	180
13	2-P	169	176	176	73	4-P	138	147	147
14	2-P	178	137	137	74	4-P	108	143	143
15	2-P	175	139	139	75	4-P	137	136	136
16	2-P	176	161	161	76	4-P	153	163	163
17	2-P	150	147	147	77	4-P	173	170	180
18	2-P	147	180	162	78	4-P	173	151	151
19	2-P	179	157	157	79	4-P	152	180	180
20	2-P	143	171	171	80	4-P	169	153	153
21	2-P	157	182	182	81	4-P	148	146	146
22	2-P	155	149	149	82	4-P	158	183	183
23	2-P	156	181	181	83	4-P	145	168	168
24	2-P	152	149	149	84	4-P	149	145	145
25	2-P	146	185	185	85	4-P	136	159	175
26	2-P	154	137	137	86	4-P	172	139	139
27	2-P	165	156	156	87	4-P	171	184	184
28	2-P	154	186	179	88	4-P	151	170	170
29	2-P	176	172	172	89	4-P	169	166	166
30	2-P	156	169	169	90	4-P	125	183	183
31	3-P	164	151	151	91	6-P	167	142	142
32	3-P	174	189	189	92	6-P	139	180	175
33	3-P	169	150	180	93	6-P	141	180	180
34	3-P	138	156	156	94	6-P	139	183	183
35	3-P	179	138	138	95	6-P	148	190	183
36	3-P	145	190	190	96	6-P	148	156	156
37	3-P	170	169	169	97	6-P	153	173	173
38	3-P	176	160	160	98	6-P	167	171	171
39	3-P	161	164	164	99	6-P	177	160	160
40	3-P	170	162	162	100	6-P	149	146	146
41	3-P	179	183	183	101	6-P	153	174	167
42	3-P	175	179	179	102	6-P	175	141	141
43	3-P	136	178	178	103	6-P	150	174	174
44	3-P	139	183	183	104	6-P	153	150	150
45	3-P	145	163	163	105	6-P	144	153	153
46	3-P	139	185	185	106	6-P	169	156	170
47	3-P	147	182	182	107	6-P	173	190	190
48	3-P	168	179	179	108	6-P	160	173	173
49	3-P	141	148	148	109	6-P	171	166	166
50	3-P	141	139	139	110	6-P	163	176	176
51	3-P	158	180	180	111	6-P	174	147	147
52	3-P	136	175	200	112	6-P	164	171	171
53	3-P	168	190	190	113	6-P	110	141	160
54	3-P	147	183	183	114	6-P	179	144	144
55	3-P	178	139	139	115	6-P	157	188	188
56	3-P	172	181	181	116	6-P	151	180	167
57	3-P	168	180	180	117	6-P	175	136	136
58	3-P	140	190	190	118	6-P	179	160	160
59	3-P	118	149	149	119	6-P	151	156	170
60	3-P	172	157	157	120	6-P	150	177	177

Fuente: elaboración Propia.

## Anexo 6. índices de Vulnerabilidad, Peligro y riesgo sísmico

N°	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		Iv	Iv [%]	Vulnerabilidad	Peligro	Riesgo	Índice Resiliencia		
	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki	CL	Ki								
1	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	C	25	B	0	A	0	121.25	31.70%	Media	Medio	Media	Media
2	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	D	45	131.25	34.31%	Media	Medio	Media	Media
3	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	B	5	B	5	A	0	C	25	A	0	C	25	155.00	40.52%	Alta	Medio	Alta	Baja
4	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	C	25	C	25	B	0	C	25	153.75	40.20%	Alta	Medio	Alta	Baja
5	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	B	15	A	0	C	25	136.25	35.62%	Alta	Medio	Alta	Baja
6	D	45	D	45	B	5	D	45	D	45	C	25	B	5	A	0	D	45	A	0	D	45	250.00	65.36%	Alta	Medio	Alta	Baja
7	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	C	25	B	15	A	0	B	5	113.75	29.74%	Media	Medio	Media	Media
8	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	C	25	B	5	C	25	C	25	A	0	C	25	171.25	44.77%	Alta	Medio	Alta	Baja
9	C	5	C	0	C	0	C	0	C	15	B	5	C	0	C	0	C	0	A	0	C	25	47.50	12.42%	Baja	Medio	Baja	Alta
10	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	C	25	B	15	A	0	B	5	113.75	29.74%	Media	Medio	Media	Media
11	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	C	25	C	25	155.00	40.52%	Alta	Medio	Alta	Baja
12	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	B	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja
13	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	C	25	B	5	B	5	B	15	A	0	C	25	141.25	36.93%	Alta	Medio	Alta	Baja
14	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	B	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja
15	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	A	0	B	15	B	0	C	25	130.00	33.99%	Media	Medio	Media	Media
16	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	C	25	B	0	A	0	121.25	31.70%	Media	Medio	Media	Media
17	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	D	45	131.25	34.31%	Media	Medio	Media	Media
18	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	B	5	B	5	A	0	C	25	A	0	C	25	155.00	40.52%	Alta	Medio	Alta	Baja
19	C	5	C	0	C	0	C	0	C	15	B	5	C	0	C	0	C	0	A	0	C	25	47.50	12.42%	Baja	Medio	Baja	Alta
20	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	B	15	A	0	C	25	136.25	35.62%	Alta	Medio	Alta	Baja
21	D	45	D	45	B	5	D	45	D	45	C	25	B	5	A	0	D	45	A	0	D	45	250.00	65.36%	Alta	Medio	Alta	Baja
22	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	C	25	B	15	A	0	B	5	113.75	29.74%	Media	Medio	Media	Media
23	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	C	25	B	5	C	25	C	25	A	0	C	25	171.25	44.77%	Alta	Medio	Alta	Baja
24	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	B	5	B	5	C	25	C	25	C	25	C	25	167.50	43.79%	Alta	Medio	Alta	Baja
25	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	C	25	B	15	A	0	B	5	113.75	29.74%	Media	Medio	Media	Media
26	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	C	25	B	5	B	5	B	15	A	0	A	0	116.25	30.39%	Media	Medio	Media	Media
27	B	5	A	0	D	45	C	25	B	5	C	25	C	25	C	25	B	15	B	0	B	5	160.00	41.83%	Alta	Medio	Alta	Baja
28	C	20	B	5	D	45	C	25	B	5	C	25	B	5	B	5	B	15	B	0	B	5	151.25	39.54%	Alta	Medio	Alta	Baja
29	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	C	25	C	25	B	0	C	25	153.75	40.20%	Alta	Medio	Alta	Baja
30	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	B	15	C	25	C	25	142.50	37.25%	Alta	Medio	Alta	Baja
31	C	20	B	5	B	5	C	25	C	15	A	0	B	5	A	0	C	25	A	0	C	25	117.50	30.72%	Media	Medio	Media	Media
32	C	20	B	5	D	45	C	25	B	5	C	25	B	5	B	5	B	15	C	25	C	25	177.50	46.41%	Alta	Medio	Alta	Baja
33	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	B	5	B	15	C	25	C	25	135.00	35.29%	Alta	Medio	Alta	Baja
34	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	B	15	A	0	B	5	86.25	22.55%	Media	Medio	Media	Media
35	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja
36	C	5	C	0	C	0	C	0	C	15	B	5	C	0	C	0	C	0	A	0	C	25	47.50	12.42%	Baja	Medio	Baja	Alta
37	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	C	25	D	45	175.00	45.75%	Alta	Medio	Alta	Baja
38	C	20	D	45	C	25	D	45	C	15	A	0	B	5	A	0	D	45	A	0	B	5	172.50	45.10%	Alta	Medio	Alta	Baja
39	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	C	25	A	0	C	25	146.25	38.24%	Alta	Medio	Alta	Baja
40	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	B	5	121.25	31.70%	Media	Medio	Media	Media

41	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	A	0	A	0	B	5	96.25	25.16%	Media	Medio	Media	Media		
42	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	A	0	C	25	A	0	B	5	132.50	34.64%	Media	Medio	Media	Media		
43	C	20	D	45	C	25	D	45	C	15	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	D	45	196.25	51.31%	Alta	Medio	Alta	Baja		
44	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja		
45	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	C	25	B	5	C	25	C	25	A	0	C	25	166.25	43.46%	Alta	Medio	Alta	Baja		
46	C	20	B	5	B	5	C	25	C	15	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	121.25	31.70%	Media	Medio	Media	Media		
47	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	A	0	C	25	A	0	C	25	137.50	35.95%	Alta	Medio	Alta	Baja		
48	C	20	B	5	D	45	C	25	C	15	C	25	B	5	C	25	C	25	C	25	C	25	202.50	52.94%	Alta	Medio	Alta	Baja		
49	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	C	25	C	25	C	25	C	25	160.00	41.83%	Alta	Medio	Alta	Baja		
50	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	B	5	B	5	C	25	C	25	C	25	C	25	162.50	42.48%	Alta	Medio	Alta	Baja		
51	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	A	0	B	5	A	0	C	25	A	0	B	5	87.50	22.88%	Media	Medio	Media	Media		
52	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	141.25	36.93%	Alta	Medio	Alta	Baja		
53	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	A	0	A	0	A	0	61.25	16.01%	Media	Medio	Media	Media		
54	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	B	5	C	25	B	0	B	5	118.75	31.05%	Media	Medio	Media	Media		
55	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	B	5	C	25	B	0	A	0	113.75	29.74%	Media	Medio	Media	Media		
56	C	20	A	0	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	A	0	C	25	B	0	B	5	116.25	30.39%	Media	Medio	Media	Media		
57	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	C	25	B	5	C	25	C	25	A	0	B	5	136.25	35.62%	Alta	Medio	Alta	Baja		
58	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	C	25	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	121.25	31.70%	Media	Medio	Media	Media		
59	C	5	C	0	C	0	C	0	C	15	B	5	C	0	C	0	C	0	A	0	C	25	47.50	12.42%	Baja	Medio	Baja	Alta		
60	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	B	5	B	5	B	5	C	25	C	25	C	25	157.50	41.18%	Alta	Medio	Alta	Baja		
61	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	B	5	B	5	B	5	C	25	B	0	B	5	131.25	34.31%	Media	Medio	Media	Media		
62	C	20	B	5	B	5	C	25	C	15	C	25	B	5	B	5	C	25	C	25	C	25	137.50	35.95%	Alta	Medio	Alta	Baja		
63	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	C	25	B	5	C	25	C	25	C	25	C	25	172.50	45.10%	Alta	Medio	Alta	Baja		
64	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	C	25	C	25	B	0	B	5	123.75	32.35%	Media	Medio	Media	Media		
65	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	A	0	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	108.75	28.43%	Media	Medio	Media	Media		
66	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	B	0	D	45	173.75	45.42%	Alta	Medio	Alta	Baja		
67	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	C	25	C	25	155.00	40.52%	Alta	Medio	Alta	Baja		
68	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	B	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja		
69	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	C	25	B	5	B	5	B	15	A	0	C	25	141.25	36.93%	Alta	Medio	Alta	Baja		
70	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	B	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja		
71	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	A	0	B	15	B	0	C	25	130.00	33.99%	Media	Medio	Media	Media		
72	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	C	25	C	25	B	0	A	0	121.25	31.70%	Media	Medio	Media	Media
73	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	D	45	131.25	34.31%	Media	Medio	Media	Media		
74	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	B	5	B	5	A	0	C	25	A	0	C	25	155.00	40.52%	Alta	Medio	Alta	Baja		
75	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	C	25	C	25	B	0	C	25	153.75	40.20%	Alta	Medio	Alta	Baja		
76	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	B	15	A	0	C	25	136.25	35.62%	Alta	Medio	Alta	Baja		
77	D	45	D	45	B	5	D	45	D	45	C	25	B	5	A	0	D	45	A	0	D	45	250.00	65.36%	Alta	Medio	Alta	Baja		
78	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	C	25	B	15	A	0	B	5	113.75	29.74%	Media	Medio	Media	Media		
79	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	B	15	A	0	B	5	86.25	22.55%	Media	Medio	Media	Media		
80	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja		
81	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	B	5	C	25	C	25	C	25	A	0	C	25	181.25	47.39%	Alta	Medio	Alta	Baja		
82	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	C	25	D	45	175.00	45.75%	Alta	Medio	Alta	Baja		
83	C	20	D	45	C	25	D	45	C	15	A	0	B	5	A	0	D	45	A	0	B	5	172.50	45.10%	Alta	Medio	Alta	Baja		
84	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	C	25	A	0	C	25	146.25	38.24%	Alta	Medio	Alta	Baja		
85	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	B	5	121.25	31.70%	Media	Medio	Media	Media		
86	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	A	0	A	0	B	5	96.25	25.16%	Media	Medio	Media	Media		

87	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	A	0	C	25	A	0	B	5	132.50	34.64%	Media	Medio	Media	Media
88	C	20	D	45	C	25	D	45	C	15	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	D	45	196.25	51.31%	Alta	Medio	Alta	Baja
89	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja
90	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	C	25	B	5	C	25	C	25	A	0	C	25	166.25	43.46%	Alta	Medio	Alta	Baja
91	C	20	B	5	B	5	C	25	C	15	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	121.25	31.70%	Media	Medio	Media	Media
92	C	5	C	0	C	0	C	0	C	15	B	5	C	0	C	0	C	0	A	0	C	25	47.50	12.42%	Baja	Medio	Baja	Alta
93	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	C	25	D	45	175.00	45.75%	Alta	Medio	Alta	Baja
94	C	20	D	45	C	25	D	45	C	15	A	0	B	5	A	0	D	45	A	0	B	5	172.50	45.10%	Alta	Medio	Alta	Baja
95	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	C	25	A	0	C	25	146.25	38.24%	Alta	Medio	Alta	Baja
96	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	B	5	121.25	31.70%	Media	Medio	Media	Media
97	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	A	0	A	0	B	5	96.25	25.16%	Media	Medio	Media	Media
98	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	A	0	C	25	A	0	B	5	132.50	34.64%	Media	Medio	Media	Media
99	C	20	D	45	C	25	D	45	C	15	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	D	45	196.25	51.31%	Alta	Medio	Alta	Baja
100	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja
101	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	C	25	B	5	C	25	C	25	A	0	C	25	166.25	43.46%	Alta	Medio	Alta	Baja
102	C	20	B	5	B	5	C	25	C	15	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	121.25	31.70%	Media	Medio	Media	Media
103	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	A	0	C	25	A	0	C	25	137.50	35.95%	Alta	Medio	Alta	Baja
104	C	20	B	5	D	45	C	25	C	15	C	25	B	5	C	25	C	25	C	25	C	25	202.50	52.94%	Alta	Medio	Alta	Baja
105	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	C	25	C	25	C	25	C	25	160.00	41.83%	Alta	Medio	Alta	Baja
106	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	B	5	B	5	C	25	C	25	C	25	C	25	162.50	42.48%	Alta	Medio	Alta	Baja
107	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	A	0	B	5	A	0	C	25	A	0	B	5	87.50	22.88%	Media	Medio	Media	Media
108	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	141.25	36.93%	Alta	Medio	Alta	Baja
109	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	B	5	B	5	B	5	A	0	A	0	A	0	61.25	16.01%	Media	Medio	Media	Media
110	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	B	5	C	25	B	0	B	5	118.75	31.05%	Media	Medio	Media	Media
111	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	B	5	C	25	B	0	A	0	113.75	29.74%	Media	Medio	Media	Media
112	C	20	A	0	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	A	0	C	25	B	0	B	5	116.25	30.39%	Media	Medio	Media	Media
113	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	C	25	C	25	B	0	C	25	153.75	40.20%	Alta	Medio	Alta	Baja
114	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	B	15	C	25	C	25	142.50	37.25%	Alta	Medio	Alta	Baja
115	C	20	B	5	B	5	C	25	C	15	A	0	B	5	A	0	C	25	A	0	C	25	117.50	30.72%	Media	Medio	Media	Media
116	C	20	B	5	D	45	C	25	B	5	C	25	B	5	B	5	B	15	C	25	C	25	177.50	46.41%	Alta	Medio	Alta	Baja
117	C	20	B	5	C	25	C	25	B	5	A	0	B	5	B	5	B	15	C	25	C	25	135.00	35.29%	Alta	Medio	Alta	Baja
118	C	20	B	5	B	5	C	25	B	5	B	5	B	5	C	25	B	15	A	0	B	5	86.25	22.55%	Media	Medio	Media	Media
119	C	20	B	5	C	25	C	25	C	15	A	0	B	5	B	5	C	25	A	0	C	25	148.75	38.89%	Alta	Medio	Alta	Baja
120	C	20	C	25	C	25	C	25	C	15	B	5	C	25	C	25	C	25	A	0	C	25	181.25	47.39%	Alta	Medio	Alta	Baja

## Anexo 7. índices de Resiliencia

2 Pisos				4 Pisos				6 Pisos			
Costo [x CU]		Valor	Daño [%]	Costo [x CU]		Valor	Daño [%]	Costo [x CU]		Valor	Daño [%]
0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0.104	0.896	1	1	0.1178	0.8822	1	1	0.074	0.926
1	1	0.27	0.626	1	1	0.3145	0.5677	1	1	0.224	0.702
1	1	0.27000	0.62600	1.00000	1	0.31450	0.56770	1.00000	1	0.22400	0.70200
1.05	1.05	0.27000	0.62610	1.05000	1.05	0.31450	0.56789	1.05000	1.05	0.22405	0.70205
1.1	1.1	0.30428	0.62649	1.10000	1.1	0.31450	0.56847	1.10000	1.1	0.22434	0.70234
1.15	1.15	0.30391	0.62724	1.15000	1.15	0.34841	0.56943	1.15000	1.15	0.22505	0.70305
1.2	1.2	0.30397	0.62839	1.20000	1.2	0.34848	0.57078	1.20000	1.2	0.22634	0.70434
1.25	1.25	0.30409	0.63000	1.25000	1.25	0.34860	0.57250	1.25000	1.25	0.22837	0.70637
1.3	1.3	0.30428	0.63207	1.30000	1.3	0.34882	0.57461	1.30000	1.3	0.23128	0.70928
1.35	1.35	0.30459	0.63465	1.35000	1.35	0.34910	0.57709	1.35000	1.35	0.23518	0.71318
1.4	1.4	0.30508	0.63774	1.40000	1.4	0.34943	0.57995	1.40000	1.4	0.24021	0.71821
1.45	1.45	0.30562	0.64136	1.45000	1.45	0.34991	0.58317	1.45000	1.45	0.24648	0.72448
1.5	1.5	0.30622	0.64553	1.50000	1.5	0.35057	0.58677	1.50000	1.5	0.25407	0.73207
1.55	1.55	0.30705	0.65026	1.55000	1.55	0.35143	0.59073	1.55000	1.55	0.26309	0.74109
1.6	1.6	0.30813	0.65555	1.60000	1.6	0.35234	0.59505	1.60000	1.6	0.27360	0.75160
1.65	1.65	0.30922	0.66142	1.65000	1.65	0.35327	0.59972	1.65000	1.65	0.28567	0.76367
1.7	1.7	0.31017	0.66786	1.70000	1.7	0.35454	0.60473	1.70000	1.7	0.29934	0.77734
1.75	1.75	0.31131	0.67488	1.75000	1.75	0.35598	0.61010	1.75000	1.75	0.31465	0.79265
1.8	1.8	0.31264	0.68248	1.80000	1.8	0.35737	0.61580	1.80000	1.8	0.33161	0.80961
1.85	1.85	0.31419	0.69065	1.85000	1.85	0.35874	0.62182	1.85000	1.85	0.35021	0.82821
1.9	1.9	0.31592	0.69940	1.90000	1.9	0.35999	0.62818	1.90000	1.9	0.37043	0.84843
1.95	1.95	0.31910	0.70870	1.95000	1.95	0.36231	0.63485	1.95000	4	0.39223	0.87023
2	2	0.32412	0.71857	2.00000	2	0.36663	0.64183	2.00000	4	0.41556	0.89356
2.05	2.05	0.33057	0.72897	2.05000	2.05	0.37093	0.64911	2.05000	4	0.44034	0.91834
2.1	2.1	0.33727	0.73991	2.10000	2.1	0.37493	0.65668	2.10000	4	0.46647	0.94447
2.15	2.15	0.34849	0.75137	2.15000	2.15	0.38333	0.66454	2.15000	4	0.49385	0.97185
2.2	2.2	0.36656	0.76334	2.20000	2.2	0.39833	0.67267	2.20000	4	0.52234	1.00034
2.25	2.25	0.38453	0.77580	2.25000	2.25	0.41689	0.68108	2.25000	4	0.55181	1.02981
2.3	2.3	0.40067	0.78872	2.30000	2.3	0.43473	0.68974	2.30000	4	0.58209	1.06009
2.35	2.35	0.41423	0.80210	2.35000	2.35	0.45377	0.69866	2.35000	4	0.61304	1.09104
2.4	2.4	0.42239	0.81590	2.40000	4	0.47140	0.70781	2.40000	4	0.64447	1.12247
2.45	4	0.44212	0.83012	2.45000	4	0.48236	0.71720	2.45000	4	0.67621	1.15421
2.5	4	0.47533	0.84472	2.50000	4	0.49070	0.72680	2.50000	4	0.70808	1.18608
2.55	4	0.49200	0.85968	2.55000	4	0.49852	0.73662	2.55000	4	0.73989	1.21789
2.6	4	0.50280	0.87497	2.60000	4	0.50435	0.74664	2.60000	4	0.77146	1.24946
2.65	4	0.53898	0.89058	2.65000	4	0.51489	0.75685	2.65000	4	0.80262	1.28062
2.7	4	0.58570	0.90647	2.70000	4	0.52251	0.76725	2.70000	4	0.83320	1.31120
2.75	4	0.60861	0.92261	2.75000	4	0.53605	0.77781	2.75000	4	0.86305	1.34105
2.8	4	0.61761	0.93899	2.80000	4	0.54636	0.78854	2.80000	4	0.89201	1.37001
2.85	4	0.62419	0.95556	2.85000	4	0.55691	0.79941	2.85000	4	0.91995	1.39795
2.9	4	0.63275	0.97230	2.90000	4	0.56407	0.81043	2.90000	4	0.94676	1.42476
2.95	4	0.64248	0.98919	2.95000	4	0.57151	0.82157	2.95000	4	0.97233	1.45033
3	4	0.64309	1.00619	3.00000	4	0.59024	0.83283	3.00000	4	0.99659	1.47459
4.00000	4		1	4.00000	4		1.00000	4.00000	4		1.00000
5.00000	4		1	5.00000	4		1.00000	5.00000	4		1.00000
6.00000	4		1	6.00000	4		1.00000	6.00000	4		1.00000
7.00000	4		1	7.00000	4		1.00000	7.00000	4		1.00000