

Probabilistic seismic fragility assessment for RC structures, in the western peripheral neighborhoods of the city of Loja.

Evaluación probabilística de fragilidad sísmica para las estructuras de HA, en los barrios periféricos occidentales de la ciudad de Loja.

Autores:

Tene González, Andrea
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Maestría en Ingeniería Civil con mención en Estructuras Sismorresistentes
Cuenca – Ecuador



andrea.tene.82@est.ucacue.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0003-3790-5965>

Maldonado Noboa, Juan
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Maestría en Ingeniería Civil con mención en Estructuras Sismorresistentes
Cuenca – Ecuador



jmaldonadon@ucacue.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0001-5329-2201>

González Maldonado, Marcos
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Maestría en Ingeniería Civil con mención en Estructuras Sismorresistentes
Cuenca – Ecuador



mgonzalezm@ucacue.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0001-3844-2897>

Citación/como citar este artículo: Tene, A., Maldonado, J. y González, M. (2023). Evaluación probabilística de fragilidad sísmica para las estructuras de HA, en los barrios periféricos occidentales de la ciudad de Loja. MQRInvestigar, 7(1), 2404-2430. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.1.2023.2404-2430>

Fechas de recepción: 25-FEB-2023 aceptación: 06-MAR-2023 publicación: 15-MAR-2023



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>

Resumen

Los sismos representan un peligro natural importante, que afecta regularmente las vidas y el entorno construido en áreas propensas a terremotos en todo el mundo, provocando pérdidas sociales y económicas, (Guha-Sapir et al., 2016). La metodología HAZUS exhibe un enfoque simple, preciso y avanzado para el desarrollo de curvas de fragilidad, y la estimación de daño (leve, moderado, extenso y colapso) de las infraestructuras ante la acción sísmica, (Patel & Vasanwala, 2019). En el Ecuador los gobiernos municipales no actúan como un agente regulador urbano eficaz, es por cuanto, aún existe la predominancia de la construcción informal. A nivel local, en la zona occidental de la ciudad de Loja, se localizan barrios periféricos con edificaciones de hormigón armado, los cuales en un gran porcentaje se encuentran construidos sin un diseño sismorresistente, por esta razón, este trabajo de investigación pretende analizar y estimar la probabilidad de daño sísmico.

Palabras claves: HAZUS, curvas de fragilidad, curva de capacidad, nivel de daño.

Abstract

Earthquakes represent a significant natural hazard, regularly affecting lives and the built environment in earthquake-prone areas around the world, causing social and economic losses, (Guha-Sapir et al., 2016). The HAZUS methodology exhibits a simple, precise and advanced approach for the development of fragility curves, and the estimation of damage (light, moderate, extensive and collapse) of the infrastructures before seismic action, (Patel & Vasanwala, 2019). In Ecuador, municipal governments do not act as an effective urban regulatory agent, it is because there is still a predominance of informal construction. At the local level, in the western zone of the city of Loja, peripheral neighborhoods with reinforced concrete buildings are located, which in a large percentage are built without an earthquake-resistant design, for this reason, this research work aims to analyze and estimate the probability of seismic damage.

Keywords: HAZUS, fragility curves, capacity curve, seismic damage states.

Introducción

Los sismos representan un peligro natural importante, que afecta regularmente las vidas y el entorno construido en áreas propensas a terremotos en todo el mundo, provocando pérdidas sociales y económicas, (Guha-Sapir et al., 2016). Terremotos como los acontecidos en Chile 2019 y México 2017, han sido los promotores para la creación de políticas de prevención de catástrofes ante eventos sísmicos (Flores & Aragón, 2018).

La evaluación del riesgo sísmico es una herramienta potencial que ayuda a definir políticas de prevención para áreas pobladas en regiones sísmicas (Menichini et al., 2022). La predicción del riesgo sísmico requiere información detallada sobre la intensidad de la aceleración del suelo, la construcción y la infraestructura expuestas. Los resultados de la evaluación de riesgos se presentan cuantificando el daño físico, pérdidas económicas, sociales y su probabilidad (Hosseinpour et al., 2021).

En las últimas décadas, se ha realizado un esfuerzo considerable, para desarrollar metodologías eficientes, que permitan la evaluación de pérdidas sísmicas, y proporcione estimaciones de daños precisas (Flores & Aragón, 2018). La metodología HAZUS exhibe un enfoque simple, preciso y avanzado para el desarrollo de curvas de fragilidad, y la estimación de daño de las infraestructuras ante la acción sísmica. Las curvas de fragilidad constituyen uno de los elementos clave, que correlacionan la intensidad debido a la actividad sísmica, con la probabilidad de alcanzar o superar la intensidad de un estado de daño (leve, moderado, extenso y colapso), (Patel & Vasanwala, 2019).

Actualmente, en el Ecuador los gobiernos municipales no actúan como un agente regulador urbano eficaz, es por cuanto, aún existe la predominancia de la construcción informal. Como consecuencia, no se da cumplimiento a los requisitos mínimos sismorresistentes establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción vigente, considerando que todo el territorio ecuatoriano tiene un alto riesgo sísmico, al ubicarse en el Cinturón de Fuego del Pacífico.

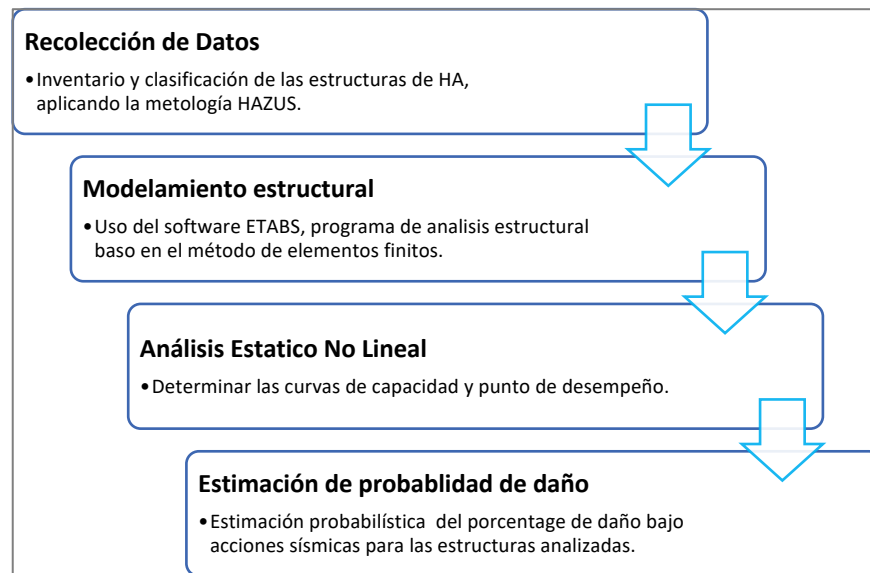
A nivel local, en la zona occidental de la ciudad de Loja, se localizan barrios periféricos con edificaciones de hormigón armado, los cuales en un gran porcentaje se encuentran construidos sin un diseño sismorresistente que considere la demanda sísmica para la zona de estudio dado, en este sector existen fallas geológicas activas que amplían la intensidad de los eventos sísmicos.

Por esta razón, este trabajo de investigación pretende analizar y estimar la probabilidad de daño, a través, del análisis de las curvas de capacidad y la aplicación del análisis de fragilidad, para cada tipología de estructura de hormigón armado.

Materiales y Métodos

La metodología desarrollada en esta investigación es tipo descriptiva-analítica. Durante este estudio, se hizo uso de la metodología HAZUS-MH, para realizar el análisis de probabilidad de estimación de daño sísmico en el área de estudio (Kircher et al., 2006). La metodología propuesta en este trabajo se resume en el diagrama de flujo de la Figura. 1.

Figura 1
Diagrama de flujo del procedimiento propuesto.



Fuente: Autores.

1. Metodología HAZUS

HAZUS (acrónimo de Hazards United States) fue concebida por la FEMA abreviatura de Federal Emergency Management Agency (Patel & Vasanwala, 2019); que contiene modelos probabilísticos para estimar las pérdidas potenciales de una región o área en particular, debido a terremotos, inundaciones y huracanes. Aunque esta metodología se desarrolló con un enfoque en los Estados Unidos, el modelo HAZUS ha sido adoptado por organizaciones de gestión de emergencias en diferentes países (Stumpf et al., 2019).

HAZUS se puede utilizar con eficacia en todas las fases de la gestión de emergencias, especialmente en la prevención (Kircher et al., 2006). Al adoptar esta técnica se puede analizar estimaciones de pérdidas potenciales de una comunidad, en función de los daños físicos a edificios y estructuras. Los componentes específicos del edificio, como son el sistema estructural, la altura, número de pisos, la magnitud de los sismos, y la especificación

del suelo son datos de ingreso para el análisis de estimación de probabilidad de daño (FEMA, 2021).

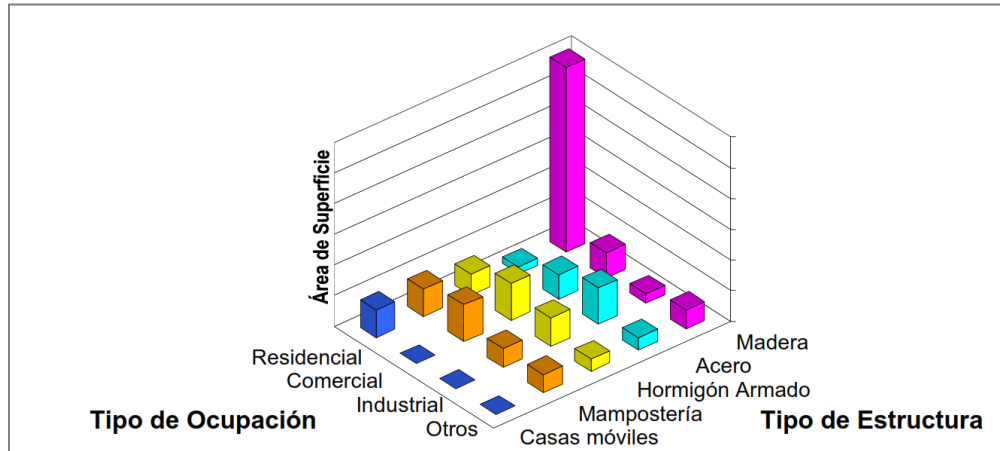
Las funciones de daños implementadas por la metodología HAZUS, se consideran predictores confiables de los efectos por terremotos para grandes grupos de estructuras. Las pérdidas por terremotos debido a daños en edificios, se basan en los estados de daños físicos que, son los contribuyentes más apropiados y significativos para ese tipo de pérdida en particular (Sousa et al., 2018). Las muertes están fuertemente influenciadas por la cantidad de edificios en estado de daño completo que incluye el desplome parcial o total de la estructura. Por el contrario, la pérdida económica directa, por ejemplo, el costo de reparación/reemplazo, se acumula a partir de contribuciones de pérdidas significativas en todos los estados de daño estructural y no estructural (Kircher et al., 2006).

1.1. Clasificación de estructuras

Las estructuras se clasifican en parámetros como tipos de ocupación, y de sistemas estructurales. Los daños se pronostican en función del tipo de sistema estructural, ya que se considera el factor clave para evaluar el rendimiento general del edificio y la función de daño (Hancilar et al., 2020). La clase de ocupación es importante para determinar la pérdida económica, debido a que, el costo total de un edificio está ligado a la función del uso que presente (por ejemplo, los hospitales son más valiosos que la mayoría de los edificios comerciales, principalmente debido a sus contenidos no estructurales, no debido a sus sistemas estructurales (Rajkumari et al., 2022).

La metodología HAZUS define 28 tipos de ocupación, para distinguir entre edificios residenciales, comerciales, industriales u otros; y se utilizan 36 tipologías de sistemas estructurales, para clasificar los edificios dentro de las categorías de madera, acero, hormigón, mampostería o casas rodantes. La categorización de edificios relaciona el tipo sistema estructural y la clase de ocupación, como se ilustra en la Figura. 2, de modo que para un área geográfica determinada se conoce la distribución de la superficie construida total de los tipos de edificios modelo para cada clase de ocupación (FEMA, 2021).

Figura 2
Gráfica de relación de tipos de estructura y ocupación.



Fuente: HAZUS-MH MR5, Technical Manual - Earthquake Model, 2015.

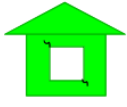



1.2. Estados de daño

Los estados de daño se definen por separado para los sistemas estructurales y no estructurales de un edificio, (Kircher et al., 2006). El daño se describe mediante uno de cuatro niveles de daño discretos: leve, moderado, severo o completo (Zucconi et al., 2022). Por supuesto, el daño real a los edificios varía como una función continua de la demanda sísmica (Stumpf et al., 2019).

Los rangos de daño se utilizan para describir el deterioro del edificio, ya que no es práctico tener una escala continua, por tal razón, estos niveles brindan al usuario una comprensión de la condición física del edificio (Halder & Paul, 2016). En la Figura 3, se detalla los estados de daños estructurales para pórticos resistentes a momentos de hormigón armado, típicos de la construcción convencional utilizada para viviendas unifamiliares (FEMA, 2021).

Figura 3

Estados de daño para pórticos resistentes a momentos de hormigón armado.

Estado de Daño		Descripción
	Leve	Grietas capilares por flexión o cortante en algunas vigas y columnas cerca de las juntas o dentro de las juntas.
	Moderado	La mayoría de las vigas y columnas muestran grietas finas. En los pórticos dúctiles, algunos de los elementos del pórtico han alcanzado la capacidad de fluencia indicada por grietas de flexión más grandes y algún desprendimiento del hormigón. Los pórticos no dúctiles pueden exhibir grietas de corte y desprendimientos más grandes.
	Severo	Algunos de los elementos del pórtico han alcanzado su máxima capacidad indicada por grandes grietas de flexión, desprendimiento de hormigón y flexión de la armadura; los elementos no dúctiles del pórtico pueden haber sufrido fallas por cortante o fallas por adherencia en los empalmes del refuerzo, pandeo del refuerzo principal en las columnas, lo que puede resultar en un colapso parcial.
	Colapso	La estructura está colapsada o en peligro inminente de colapsar debido a la falla por fragilidad de los elementos no dúctiles del pórtico o la pérdida de estabilidad del pórtico.

Fuente: HAZUS-MH MR5, Technical Manual - Earthquake Model, 2015.

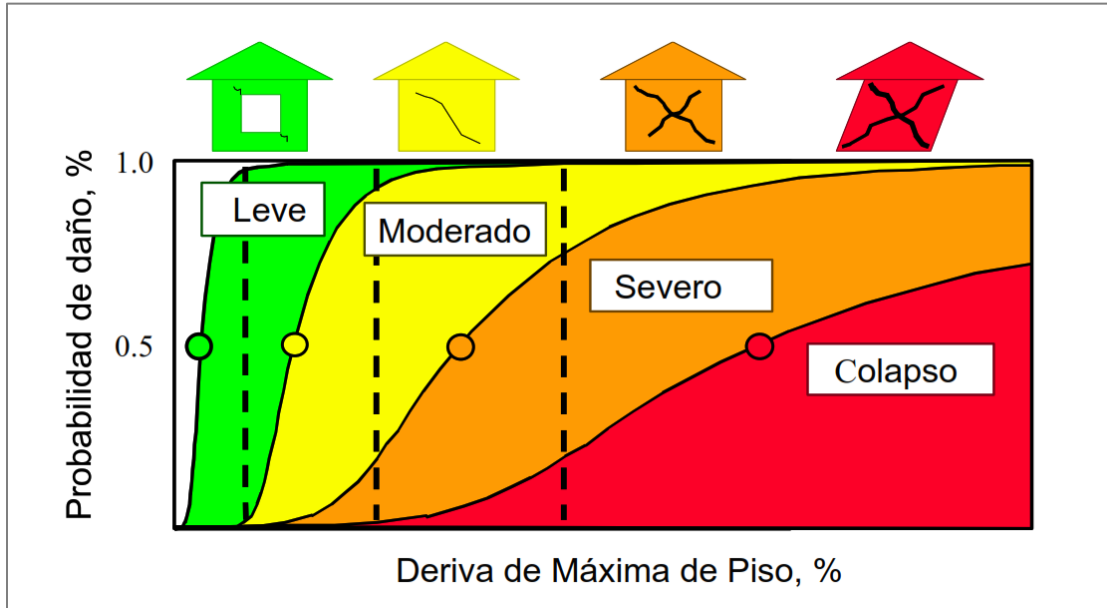
1.3. Curvas de Fragilidad

Las curvas de fragilidad utilizadas en la metodología HAZUS, son funciones de probabilidad logarítmica normal, que figuran la posibilidad de alcanzar o exceder los estados de daños estructurales y no estructurales, dado un valor estimado de la respuesta máxima del edificio, por ejemplo, el desplazamiento espectral (Miano et al., 2022).

Las curvas de fragilidad distribuyen el daño en sus diferentes niveles: Leve, Moderado, Extensivo y Completo. Para cualquier valor dado de respuesta espectral, las probabilidades discretas de nivel de daño se obtienen como la diferencia de las probabilidades acumuladas de alcanzar o exceder estados de daño sucesivos (Kircher et al., 2006).

Figura 4

Esquema de curvas de fragilidad para estado de daño leve, moderado, severo y colapso.



Fuente: HAZUS-MH MR5, Technical Manual - Earthquake Model, 2015.

2. Recopilación de datos

Para la estimación de pérdidas sísmicas en el área de estudio, se realizó el levantamiento de información que implica:

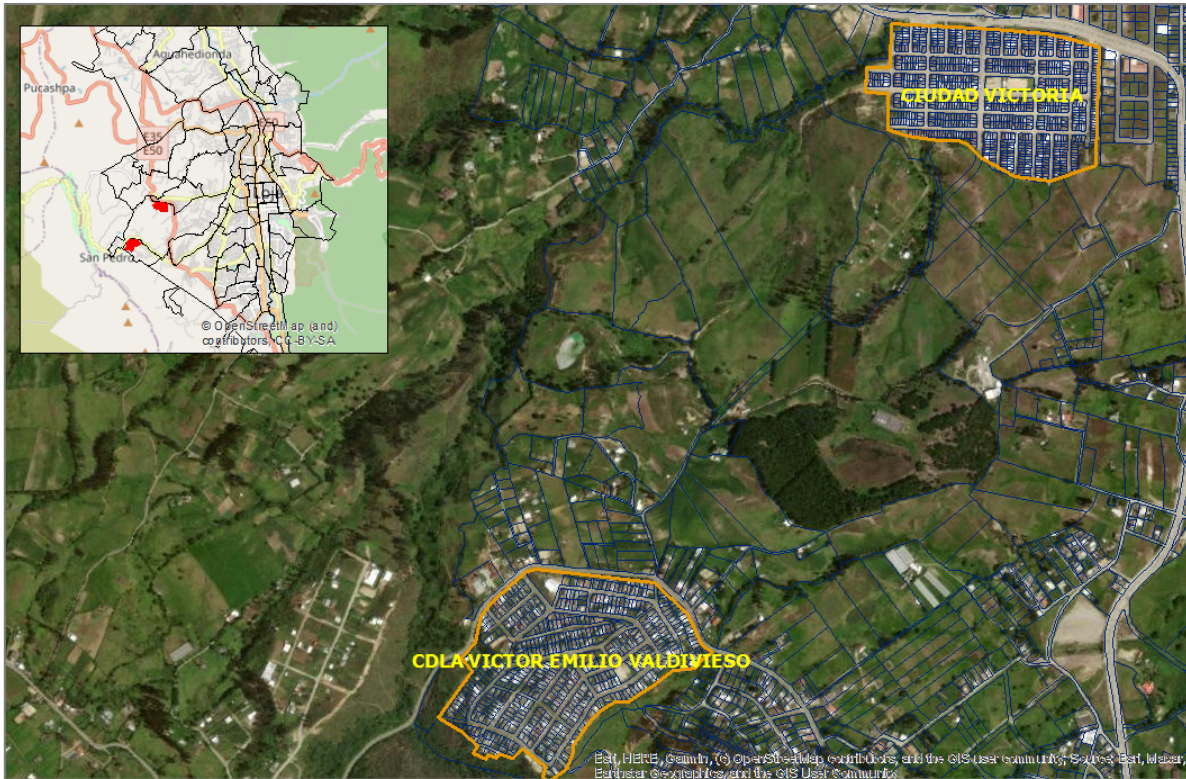
- Estado geológico del área de estudio.
- Tipología estructural según clasificación HAZUS.
- Características mecánicas de los materiales utilizados.
- Secciones características de las viviendas tipo.
- Espectro de respuesta

2.1.Caso de Estudio

En la zona periférica occidental de la ciudad de Loja, se localizan las urbanizaciones: Ciudad Victoria y Víctor Emilio Valdivieso, Figura 5. Estas se caracterizan por poseer una alta densidad de viviendas, edificadas con sistemas estructurales sin consideraciones sismorresistentes que cumplan actualmente con los requisitos mínimos que establece la norma, debido a la amenaza sísmica alta presente en todo el territorio ecuatoriano (NEC: Peligro Sísmico. Diseño Sismo Resistente, 2015).

Figura 5

Ubicación de los barrios críticos en la zona occidental de la ciudad de Loja.

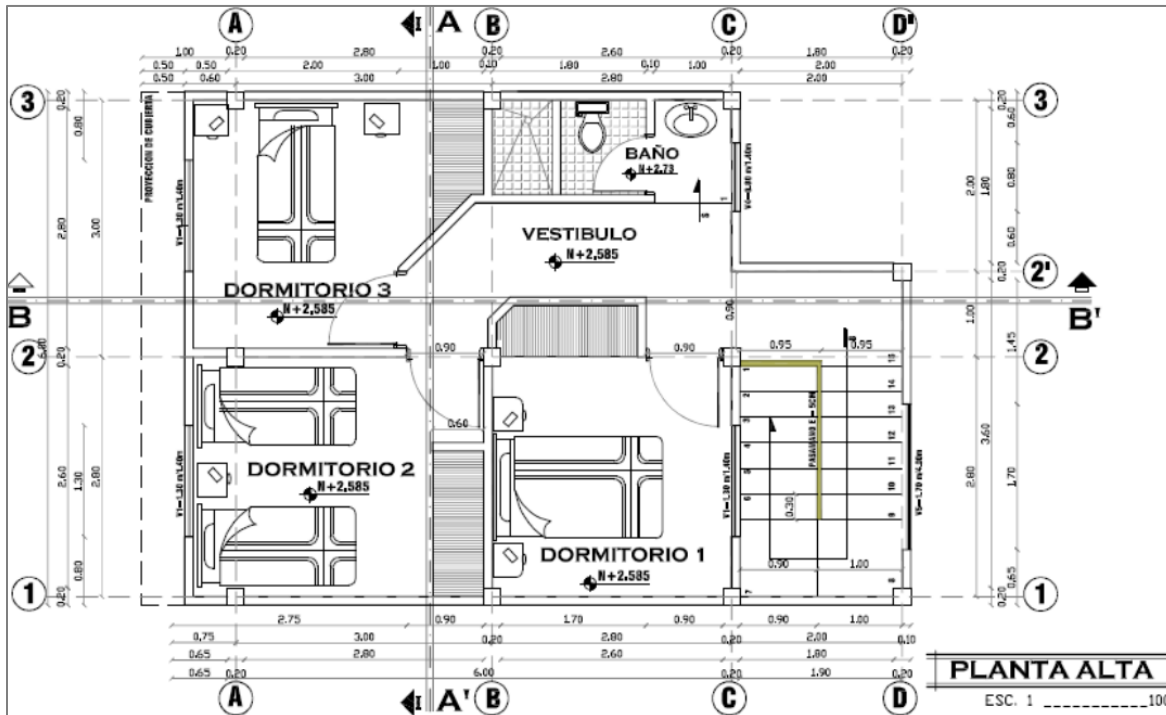


Fuente: Autores.

En el conjunto habitacional Ciudad Victoria, construida desde el 2006 bajo administración de la municipalidad de la ciudad de Loja, se compone de 865 viviendas de interés social. Su sistema estructural corresponde a pórticos de hormigón armado, con secciones de columnas de 20x20 cm, vigas bandas de 20x20cm, según la configuración establecida en los planos aprobados, Figura 6. El hormigón empleado tiene una resistencia a la compresión de 210 kg/cm²; y el acero en barras un límite de fluencia de 4200 kg/cm².

Figura 6

Plano de la configuración de las viviendas en el conjunto habitacional Ciudad Victoria.



Fuente: Gobierno Autónomo descentralizado de Loja.

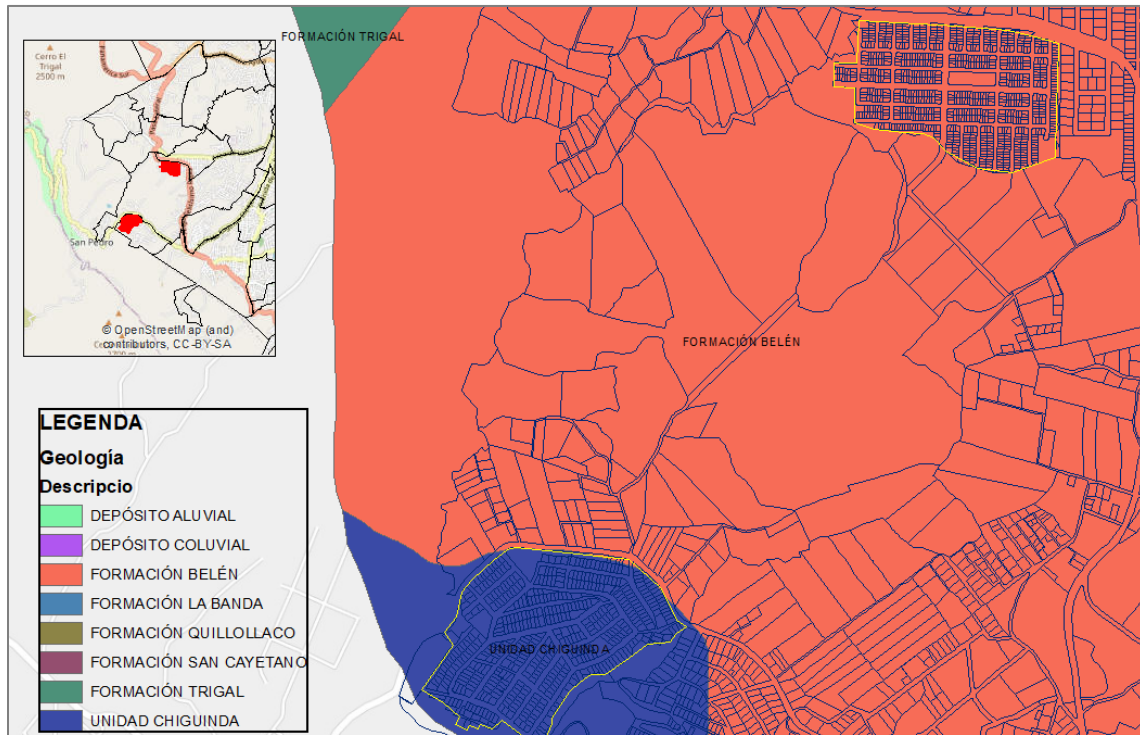
La ciudadela Víctor Emilio Valdivieso, inicia como un asentamiento ilegal, el mismo que ha sido intervenido mediante programas sociales, lo que ha permitido que se regulen y mejoren los sistemas estructurales de las viviendas existentes. Actualmente existen 608 viviendas, construidas con sistemas estructurales, de los cuales, sólo 241 viviendas corresponden a pórticos de hormigón armado, con secciones mínimas similares a Ciudad Victoria.

2.2. Estado geológico del área de estudio.

La formación geológica que se identifica en el área de estudio, corresponde para la ciudadela Víctor Emilio Valdivieso (Tierras Coloradas), la Unidad Chiguinda. Esta formación se caracteriza por rocas metamórficas de bajo grado desde pizarras y filitas hasta esquistos grafitosos, variablemente intercaladas con cuarcitas (Ambuludí, 2015).

En el caso de la ciudadela Ciudad Victoria, se identifica la Formación Belén, que litológicamente está constituida por lutitas marrones y limolitas con laminación paralela que, ocasionalmente presentan restos vegetales. Existen areniscas con nódulos de yeso y concreciones carbonatadas, además de, conglomerados estratificados horizontalmente (Zhinin, 2019).

Figura 7
Formaciones geológicas del área de estudio.



Fuente: Autores.

Según la Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15), se definen seis tipos de perfil de suelo. Esta clasificación se realiza en base al análisis geológico de los 30 m superiores del del perfil tipo A, B, C, D, E; para el tipo F se realizan estudios en la parte inferior de los 30 m superiores del perfil (NEC: Peligro Sísmico. Diseño Sismo Resistente, 2015).

En el caso particular del área de estudio, en base a ensayos geofísicos realizados de sísmica de refracción, método MASW, se determina que la velocidad de corte se encuentra entre rangos de $360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$, por lo cual se lo clasifica como suelo de perfil tipo D. Este tipo de velocidades sísmicas son típicas de materiales de granulometrías finas y poco consolidados.

2.3. Tipología estructural según clasificación HAZUS.

La metodología HAZUS establece el código C1 para crujiás de hormigón armado. Esta clasificación se subcategoriza en C1L, C1M y C1H, para edificaciones de baja, mediana y alta altura respectivamente, (HAZUS, 2014).

En base a esta categorización se clasifica las viviendas para el conjunto habitacional Ciudad Victoria y la ciudadela Victor Emilio Valdiviezo, como se detalla en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1.

Clasificación de viviendas en el conjunto habitacional Ciudad Victoria.

COJUNTO HABITACIONAL CIUDAD VICTORIA					
COD	DESCRIPCIÓN	RANGO		INVENTARIO	
		ESPECIFICACIÓN	PISOS	# VIENDAS	%
C1L	Pórticos de vigas y columnas de hormigón armado. Se incluyen edificios antiguos y modernos.	BAJOS	1-3	865	100
C1M		MEDIANOS	4-7	-	-
C1H		ALTOS	8+	-	-

Fuente: Autores.

Tabla 2

Clasificación de viviendas en la ciudadela Victor Emilio Valdiviezo.

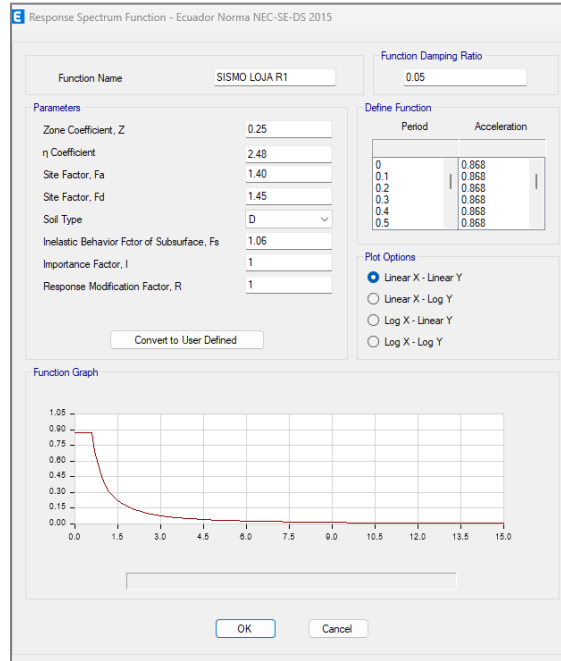
CIUDADELA VICTOR EMILIO VALDIVIESO					
COD	DESCRIPCIÓN	RANGO		INVENTARIO	
		ESPECIFICACIÓN	PISOS	# VIENDAS	%
C1L	Pórticos de vigas y columnas de hormigón armado. Se incluyen edificios antiguos y modernos.	BAJOS	1-3	241	100
C1M		MEDIANOS	4-7	-	-
C1H		ALTOS	8+	-	-

Fuente: Autores.

2.4.Espectro de respuesta

El espectro de respuesta representa la respuesta máxima de un oscilador de propiedades dinámicas variables (período natural o frecuencia) relacionado con un movimiento del suelo específico, (Bonnet, 2003). Para representar la acción dinámica del sismo de diseño, se emplea un 5% de amortiguamiento con relación del crítico (NEC: Peligro Sísmico. Diseño Sismo Resistente, 2015). Existen espectros de respuesta elásticos e inelásticos, (A. H. Barbat et al., 2008). Para el presente estudio se consideró un espectro de respuesta elástico, considerando un tipo de sismo raro, para un periodo de retorno de 475 años.

Figura 8
Espectro de respuesta para área de estudio.

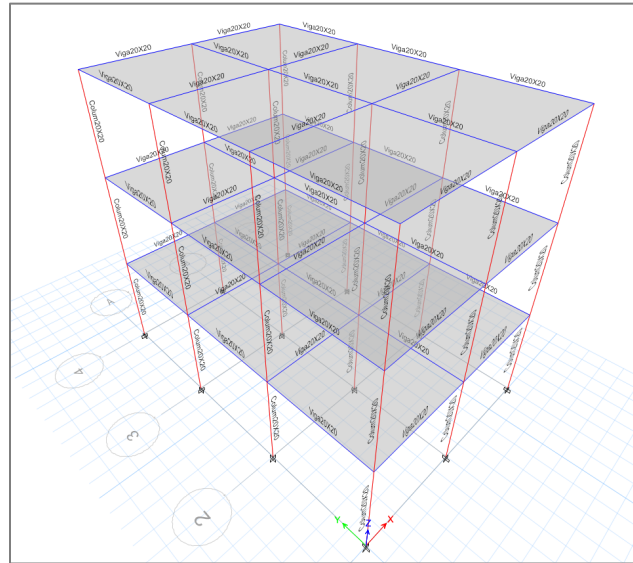


Fuente: Autores.

2. Modelamiento estructural

Para el análisis de la estructura tipo se empleó un software que permita el modelamiento y análisis con método de elementos finitos. Para el presente caso de estudio se empleó el software ETABS, que nos permite realizar el Análisis Estático no Lineal (Pushover), mediante el uso de FEMA 440.

Figura 8
Modelado de estructural tipo.



Fuente: Autores.

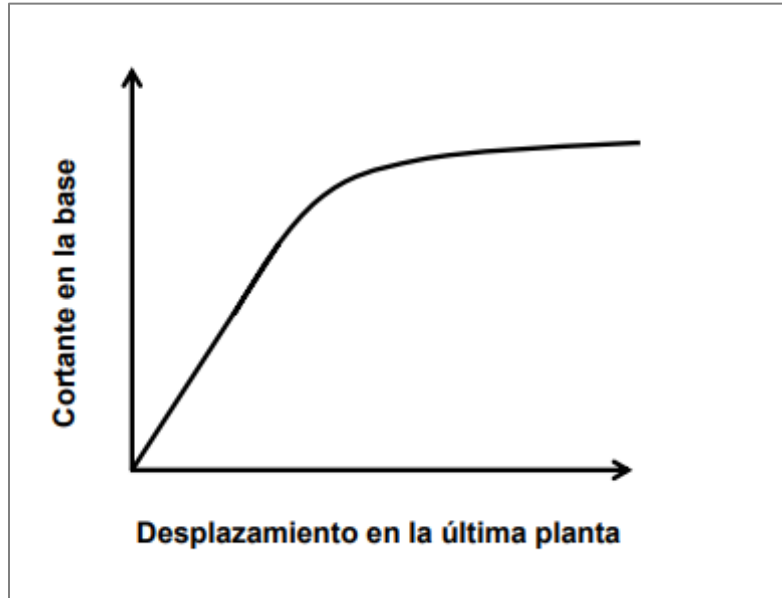
3. Análisis Estático No Lineal

3.1. Curva de capacidad

Esta curva es la representación gráfica de la resistencia a las fuerzas lateral de una estructura correlacionado con el desplazamiento lateral máximo (Kircher et al., 2006); es decir, un gráfico de fuerza-deflexión. Se deriva de la representación gráfica entre el cortante basal y el desplazamiento del edificio en la azotea, conocido comúnmente como Pushover, Figura 9. Para fines de análisis, se realiza la conversión del corte basal en aceleración espectral y el desplazamiento de azotea en desplazamiento espectral, usando propiedades modales que representan la respuesta Pushover (Bonnet, 2003).

Figura 9

Esquema de curva de capacidad.



Fuente: HAZUS-MH MR5, Technical Manual - Earthquake Model, 2015.

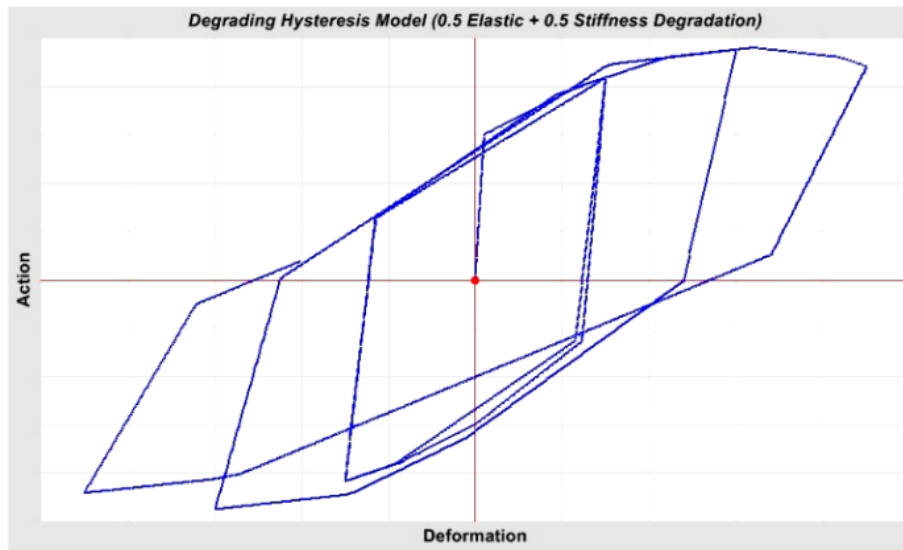
3.2. Degradación de rigidez.

La degradación de la rigidez para elementos de concreto reforzado es el resultado del agrietamiento, pérdida de continuidad, en función de las características de la estructura (propiedades de los materiales, geometría), así como de la historia de carga que involucra la intensidad en cada ciclo, número de ciclos, subsecuencia de los ciclos de carga (Escobar, 2014)

Para este trabajo de investigación, se consideró el modelo histórico de degradación de resistencia, para estimar el daño acumulado en las estructuras. Este modelo utiliza un bucle histerético degradante que relaciona la disminución de la disipación de energía y la rigidez de descarga, con el aumento de la deformación plástica (Mazhar et al., 2021).

Como factor de degradación de rigidez se adoptó un valor de 0.5, el cual considera degradación de por rigidez y elasticidad. Esta reducción se debe principalmente a la reducción de momento de inercia o del área de la sección transversal debido a la propagación del agrietamiento con el aumento del historial de carga de desplazamiento (Thomas & Ramadass, 2021). La normativa NEC-15, considera este factor para el calculo de rigidez y de las derivas máximas (NEC: Peligro Sísmico. Diseño Sismo Resistente, 2015).

Figura 10
Modelo de histéretico de degradación.



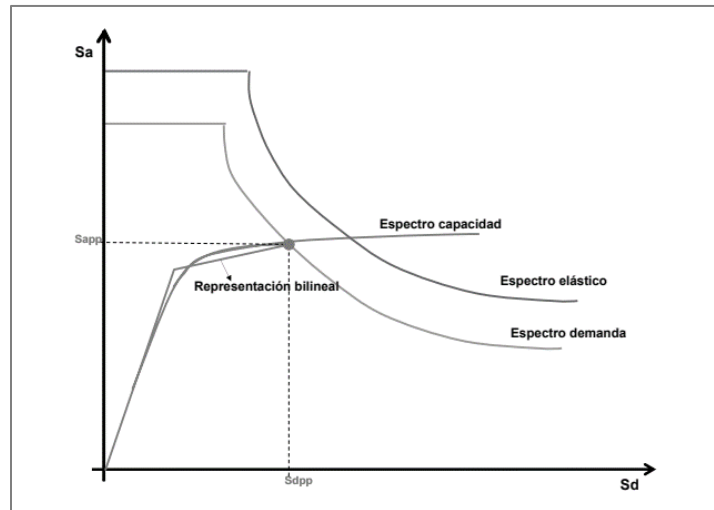
Fuente: NL-Modeling-and-Analysis-of-RC-Buildings, 2016

3.3. Punto de desempeño.

El punto de desempeño representa el máximo desplazamiento estructural esperado para el terremoto de demanda (López & Del Re Ruíz, 2008). Este se obtiene de la superposición del espectro de capacidad y demanda (Vielma et al., 2008). Al correlacionar este punto con el nivel de daño solicitado por el diseño sísmico por desempeño, se realiza la aprobación o ajuste de la estructura (H. Barbat et al., 1995).

Figura 10

Gráfica de obtención de punto de desempeño.

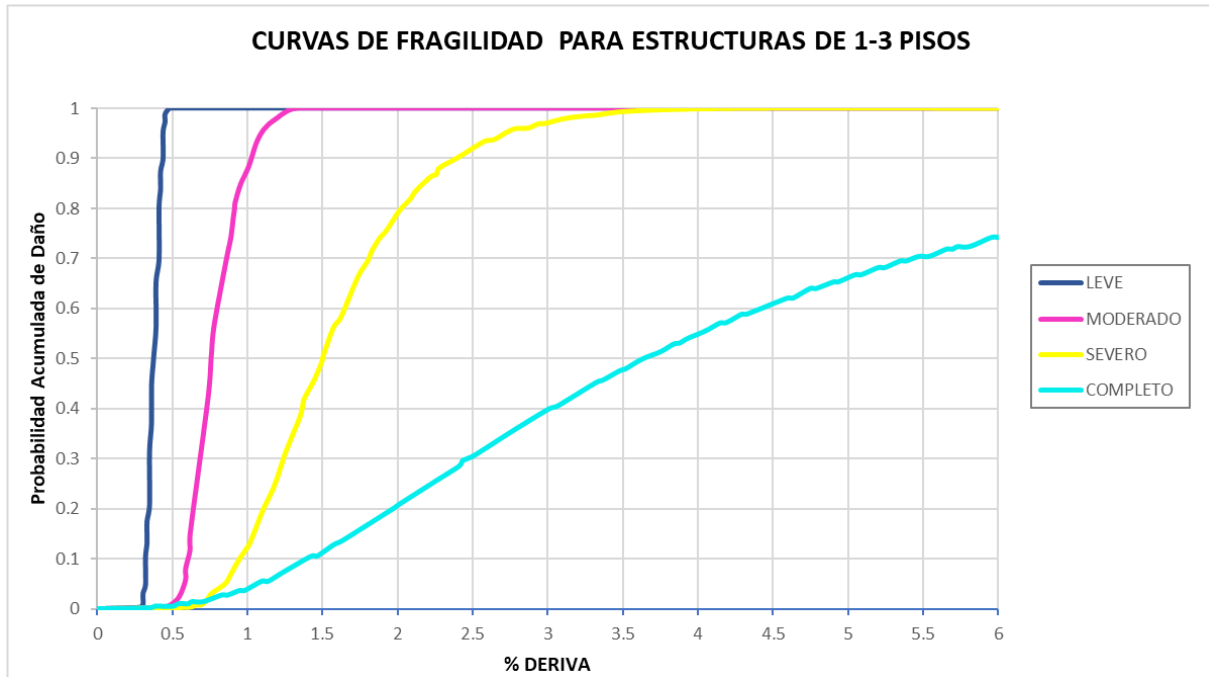


Fuente: HAZUS-MH MR5, Technical Manual - Earthquake Model, 2015.

4. Estimación de probabilidad de daño.

Para realizar en este estudio la estimación de probabilidad de nivel de daño, se hizo uso de las curvas de fragilidad de deriva de piso máxima, elaboradas por Aguiar y Bobadilla (2006). Estas curvas fueron desarrolladas en base al estudio de 72 estructuras ante la acción sísmica de 9 sismos de intensidad mayor a 1g; con lo que obtiene un total de 692 casos, para edificios de hormigón armado de 1 a 6 pisos. Estas curvas responden a la forma constructiva en el Ecuador, y se encuentran clasificadas para cuatro niveles de daño denominados: leve, moderado, extensivo y completo (Aguiar & Bobadilla, 2006).

Figura 11
Curvas de fragilidad para estructuras de hormigón armado de 1 a 3 pisos.



Fuente: Aguiar y Bodilla, 2006.

Resultados y Discusión

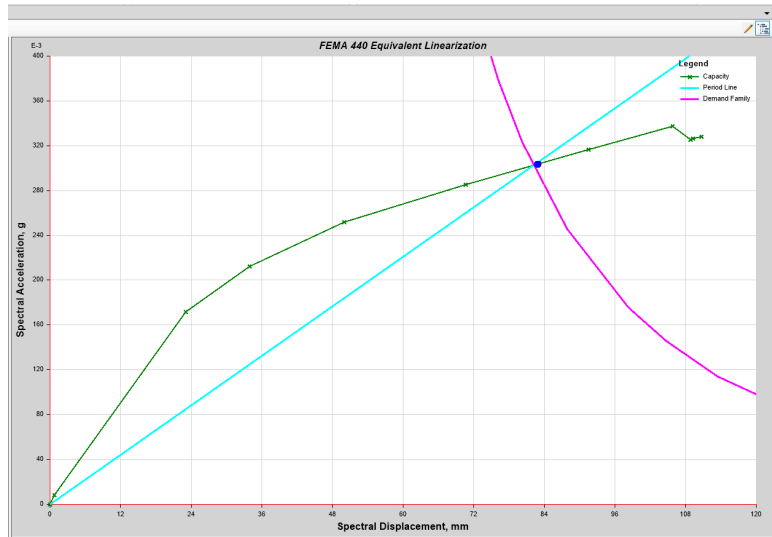
La metodología HAZUS establece un método eficaz en tiempo y recursos, para la evaluación del riesgo sísmico para el tipo general de construcción. Este tipo de procedimiento ofrece el criterio para estimar el nivel de daño de cualquier estructura, asociado a un valor específico de deriva de piso, y poder efectuar rehabilitaciones en la estructura de manera preventiva.

Para el caso de estudio, las estructuras presentes en los barrios analizados, clasifican dentro de la tipología HAZUS, como estructuras con pórticos de hormigón armado para uso residencial, de baja altura, es decir no sobrepasan los tres pisos, por lo cual, para el análisis de estimación de probabilidad de daño se hace uso de la Curva de Fragilidad, para estructuras de 1 – 3 pisos.

Se realiza el análisis estático no lineal de la estructura tipo, mediante la aplicación del método planteado por FEMA 440, conocido como espectro de capacidad, en primera etapa se considera a la estructura en estudio sin degradación de rigidez, por lo cual, se obtiene que el punto de desempeño (desplazamiento y aceleración máximo), corresponde a los valores de $S_a=0.30g$ y $S_d=83.03mm$, según lo indica la Figura 12.

Figura 12

Punto de desempeño para estructuras de hormigón armado de 1 a 3 pisos, sin degradación de rigidez.

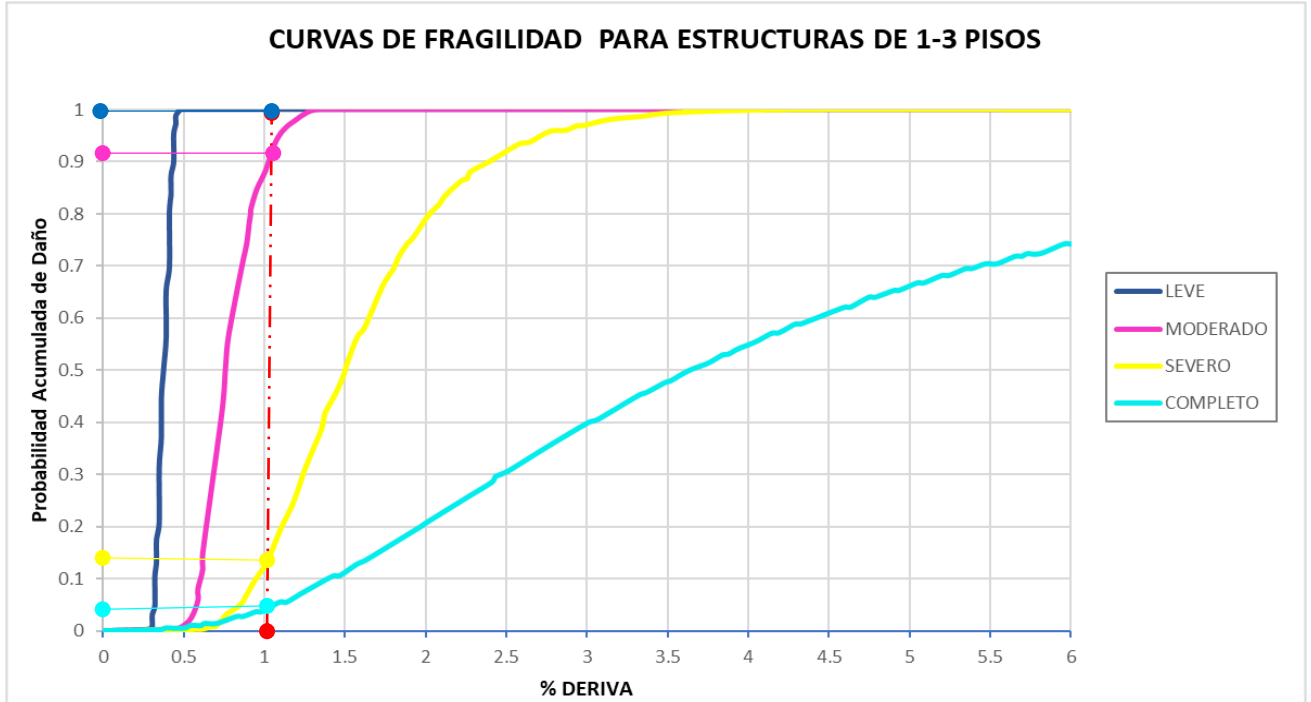


Fuente: Autores.

Al obtener el punto de desempeño se determina la deriva de piso máxima, de la primera etapa en estudio, obteniendo una deriva del 1.02%. Como resultado al aplicar las curvas de fragilidad con el porcentaje de deriva calculado, se estima la probabilidad de nivel de daño: leve, moderado, severo y completo; la cual se detalla en la Tabla 3.

Figura 13

Estimación de probabilidad de daño, mediante el uso de curvas de fragilidad para estructuras de hormigón armado de 1 a 3 pisos, en primera etapa.



Fuente: Autores.

Tabla 3

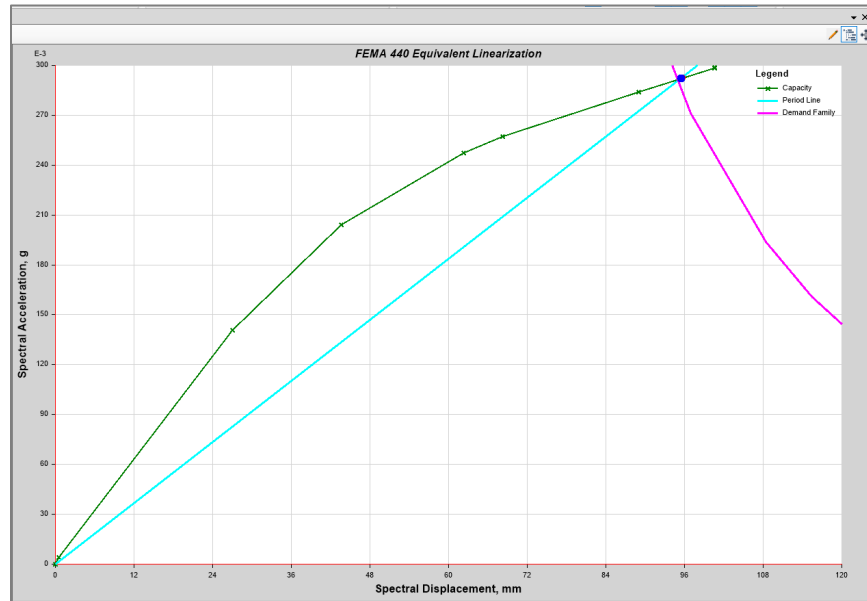
Probabilidad de daño para el área de estudio.

PROBABILIDAD DE DAÑO	
ESTADO DE DAÑO	%
LEVE	100
MODERADO	92
SEVERO	13
COMPLETO	4

Fuente: Autores.

Como segunda etapa, dado que la estructuras en estudio han sido sometidas a excitaciones sísmicas desde su etapa constructiva hasta la actualidad, se realiza un segundo modelamiento considerando la degradación de rigidez, por lo cual, se obtiene nuevamente el punto de desempeño de la estructura con degradación, obteniendo valores de $S_a=0.29g$ y $S_d=95.66$ mm, según lo indica la Figura 14.

Figura 14
Punto de desempeño para estructuras de hormigón armado de 1 a 3 pisos, con degradación de rigidez

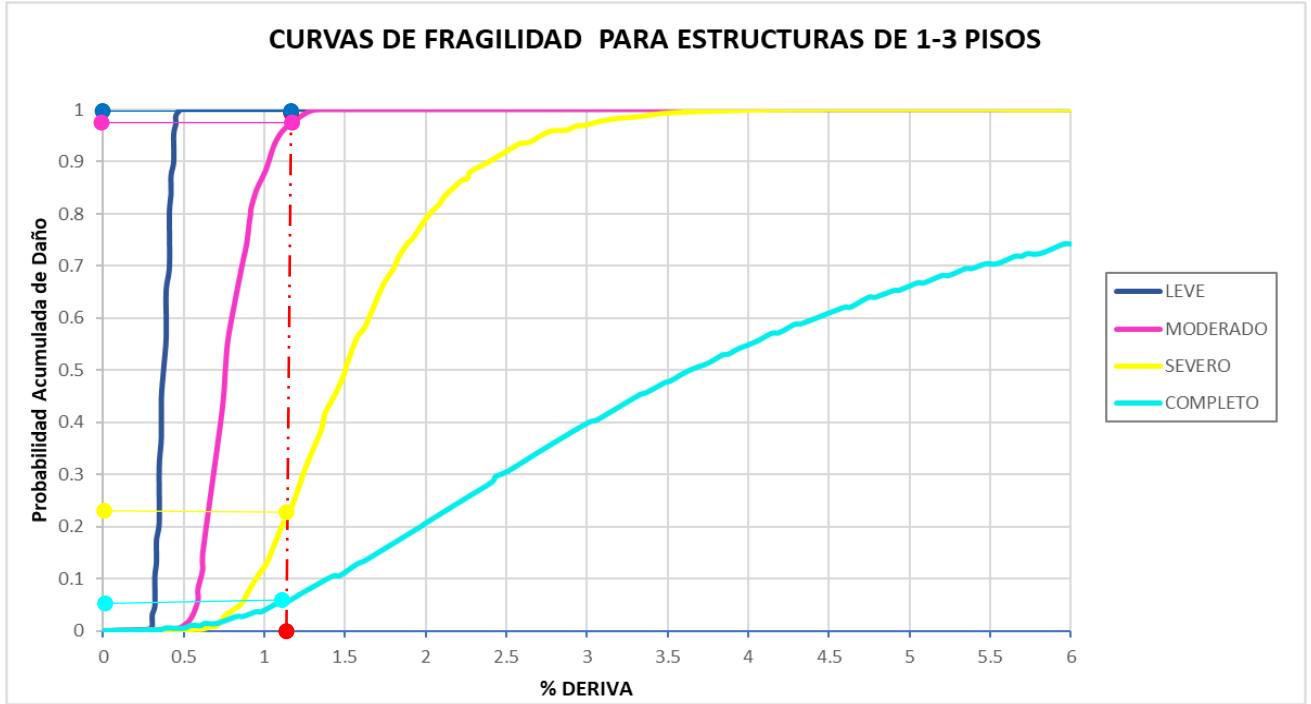


Fuente: Autores

Dado el punto de desempeño se realiza el obtiene la deriva de piso máxima, de la segunda etapa en estudio, obteniendo una deriva del 1.18%. Como resultado al aplicar las curvas de fragilidad con el porcentaje de deriva calculado, se estima la probabilidad de daño de tipo leve, moderado, severo y completo; la cual se detalla en la Tabla 4.

Figura 13

Estimación de nivel de daño, mediante el uso de curvas de fragilidad para estructuras de hormigón armado de 1 a 3 pisos, en primera etapa.



Fuente: Autores.

Tabla 3

Probabilidad de daño para el área de estudio.

PROBABILIDAD DE DAÑO	
ESTADO DE DAÑO	%
LEVE	100
MODERADO	98
SEVERO	22
COMPLETO	6

Fuente: Autores.

Conclusiones

- La aplicación de las curvas de fragilidad para la estimación de nivel daño de la estructuras, permite realizar un análisis eficaz, para la prevención y mitigación de desastres que dan origen a pérdidas humanas y económicas.
- El sistema estructural de las viviendas para los barrios del área de estudio, son secciones que no cumplen los requisitos mínimos de la NEC-15-SE-DS para un nivel de seguridad de vida, tal es el caso de las secciones de vigas bandas de 20x20cm, empleadas en la construcción de estas viviendas. Siendo el requisito mínimo secciones con un peralte no menor a 25cm.
- Para la tipología de estructuras de hormigón armado de 1-3 pisos, en la zona de estudio, considerando la degradación de rigidez que presentan, la probabilidad de daño para cada unidad de vivienda corresponde a un nivel de daño leve del 100%, moderado del 98%, severo 22% y completo 6%.
- Al presentar el 100% de daño leve en todas las edificaciones, mediante la acción sísmica de un sismo leve, se corrobora que las estructuras deben ser reforzadas para garantizar la seguridad y prevenir catástrofes, y cumplir con la demanda sísmica para la zona de estudio.

Referencias bibliográficas

- Aguiar, R., & Bobadilla, C. (2006). CURVAS DE FRAGILIDAD PARA ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO Y COMPARACIÓN CON HAZUS. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.*, 6(1), 49–58.
- Ambuludí, H. (2015). *Estudio Geológico Estructural E Inventario De Deslizamientos Del Area 3 De La Cuenca De Loja*.
[http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/11433/1/Ambuludi Arcentales Henry Rabindranath.pdf](http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/11433/1/Ambuludi%20Arcentales%20Henry%20Rabindranath.pdf)
- Barbat, A. H., Pujades, L. G., & Lantada, N. (2008). Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: Application to Barcelona. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(10–11), 851–865.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.10.006>
- Barbat, H., Oller, S., & Vielma, J. . (1995). Cálculo y diseño sismorresistente de edificios. Aplicación de la norma NCSE-02. In *Catalònia cultura* (Issue 41).
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/76213/MIS72.pdf>
- Bonnet, R. L. D. (2003). Desempeño sísmico de edificios: binomio capacidad-demanda. *Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a Entornos Urbanos En Zonas de Amenaza Alta y Moderada.*, 47–98.
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93542>
- Escobar, J. J. (2014). *Efecto Sísmico De Tres Modelos Histeréticos Para Muros De Mampostería Confinada En Los Espectros De Respuesta Inelásticos*.
- FEMA. (2021). *Hazus Inventory Technical Manual. February*, 185.
- Flores, L., & Aragón, J. (2018). Estrategias para la reducción del riesgo sísmico en México. *Cenapred Mexico*, 25.
- Guha-Sapir, D., Hoyois, P., & Below, R. (2016). Annual Disaster Statistical Review 2015: The numbers and trends Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) Institute of Health and Society (IRSS) Université Catholique de Louvain – Brussels, Belgium*.
<https://reliefweb.int/report/world/annual-disaster-statistical-review-2015-numbers-and-trends>
- Halder, L., & Paul, S. (2016). Seismic Damage Evaluation of Gravity Load Designed Low Rise RC Building Using Non-linear Static Method. *Procedia Engineering*, 144, 1373–1380. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.05.167>
- Hancilar, U., Sesetyan, K., & Cakti, E. (2020). Comparative earthquake loss estimations for high-code buildings in Istanbul. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129(November 2019), 105956. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105956>
- HAZUS. (2014). Hazusr-MHMR5 technical manuals and user's manuals. *Building Sciences and Technology Acting Branch Chief*, 119. www.fema.gov/plan/prevent/hazus
- Hosseinpour, V., Saeidi, A., Nollet, M. J., & Nastev, M. (2021). Seismic loss estimation software: A comprehensive review of risk assessment steps, software development and limitations. *Engineering Structures*, 232(January).
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111866>
- Kircher, C. A., Whitman, R. V., & Holmes, W. T. (2006). HAZUS Earthquake Loss Estimation Methods. *Natural Hazards Review*, 7(2), 45–59.

- [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1527-6988\(2006\)7:2\(45\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1527-6988(2006)7:2(45))
- López, O. A., & Del Re Ruíz, G. (2008). Evaluación de los métodos de análisis estático no lineal para determinar la demanda sísmica en estructuras aporricadas de concreto armado. *Boletín Técnico/Technical Bulletin*, 46(3), 1–28.
- Mazhar, H., Najam, F. A., Ahmed, L., & Akram, H. Z. (2021). *Nonlinear Modelling and Analysis of RC Buildings using ETABS (v 2016 and onwards)*.
- Menichini, G., Nistri, V., Boschi, S., Del Monte, E., Orlando, M., & Vignoli, A. (2022). Calibration of vulnerability and fragility curves from moderate intensity Italian earthquake damage data. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 67(October 2021), 102676. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102676>
- Miano, A., Mele, A., & Prota, A. (2022). Fragility curves for different classes of existing RC buildings under ground differential settlements. *Engineering Structures*, 257(November 2021), 114077. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114077>
- NEC: Peligro sísmico. Diseño sismo resistente, (2015).
- Patel, N. K., & Vasanwala, S. A. (2019). Propagating fragility curve for rc buildings via hazus methodology. *Materials Today: Proceedings*, 32, 314–320. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.399>
- Rajkumari, S., Thakkar, K., & Goyal, H. (2022). Fragility analysis of structures subjected to seismic excitation: A state-of-the-art review. *Structures*, 40(April), 303–316. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.023>
- Sousa, L., Marques, M., Silva, V., & Weatherill, G. (2018). *Epistemic Uncertainty in Hazard and Fragility Modelling for Earthquake Risk Assessment*. June, 1–12.
- Stumpf, M., Sambanis, A., & Cailas, M. (2019). Utilizing HAZUS and PACER SURGE to map and characterize hospitals in Illinois within the New Madrid seismic zone. *Progress in Disaster Science*, 4, 100048. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100048>
- Thomas, J., & Ramadass, S. (2021). Improved empirical model for the strut efficiency factor and the stiffness degradation coefficient for the strength and the deflection prediction of FRP RC deep beams. *Structures*, 29(October 2020), 2044–2066. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.039>
- Vielma, J. C., Barbat, A. H., & Oller, S. (2008). Un índice de daño sísmico objetivo para la evaluación de los edificios de hormigón armado. *An Objective Seismic Damage Index to Evaluate the Reinforced Concrete Buildings Performance*, 59(248), 53–64.
- Zhinin, O. (2019). *MAPA DE CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA URBANIZACIÓN MANUEL CARRIÓN PINZANO, PARROQUIA SUCRE, CANTÓN Y PROVINCIA DE LOJA*.
- Zucconi, M., Romano, F., & Ferracuti, B. (2022). Typological fragility curves for RC buildings: influence of damage index and building sample selection. *Engineering Structures*, 266(58), 114627. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114627>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.