

Método del Índice de Vulnerabilidad Sísmica Usando el Sistema de Información Geográfica, Una Aplicación a Escala Urbana

Cervera, Oscar¹; Lorrén, Ángel¹; Ruiz, Ángel¹

¹Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil Ambiental, Chiclayo, Perú

Resumen: El Perú, dado que está establecido dentro del Anillo de Fuego del Pacífico es considerado un país con una frecuencia alta de sismos. Diversos estudios indican que frente a las costas se presenta acoplamiento sísmico. Esto sumado a la escasez de medios económicos para contratar asesoría profesional al diseñar y construir la edificación, genera la inadecuada utilización de normas técnicas de edificaciones. El presente estudio tuvo como objetivo estimar niveles de vulnerabilidad sísmica para construcciones existentes de zona sur-este dentro del distrito de Lambayeque, situado en el norte costero peruano. Para lograrlo, se recurrió al método italiano del índice de vulnerabilidad, por lo que se evaluó 3 054 edificaciones pertenecientes a 4 tipologías: (1) construcciones de adobe, (2) albañilería no confinada, (3) albañilería confinada y (4) concreto armado. De las edificaciones analizadas, el 15,62% tiene un nivel de vulnerabilidad bajo, el 62,25% tiene un nivel de vulnerabilidad media, el 22,13% presenta una vulnerabilidad alta. Además, se realizó un mapa temático con el Sistema de Información Geográfica y se expresa su vulnerabilidad sísmica por niveles cuya identificación se realiza mediante escala de colores. Como complemento, se elaboró un Estudio de Mecánica de Suelos y se obtuvieron capacidades de carga admisible del suelo de entre 0,64 kg/cm² y 1,00 kg/cm².

Palabras clave: vulnerabilidad sísmica; índice de vulnerabilidad; adobe; albañilería; concreto armado; SIG

Seismic Vulnerability Index Method Using the Geographic Information System, An Application on an Urban Scale

Abstract: Peru, since it is established within the Pacific Ring of Fire, is considered a country with a high frequency of earthquakes. Various studies indicate that seismic coupling occurs off the coast. This, added to the scarcity of economic means to hire professional advice when designing and constructing the building, generates the inappropriate use of technical building standards. The objective of this study was to estimate levels of seismic vulnerability for existing constructions in the south-east area within the district of Lambayeque, located in the northern Peruvian coast. To achieve this, the Italian method of the vulnerability index was used, evaluating 3,054 buildings belonging to 4 types: (1) adobe buildings, (2) unconfined masonry, (3) confined masonry, and (4) reinforced concrete. Of the buildings analyzed, 15.62% has a low vulnerability level, 62.25% has a medium vulnerability level, and 22.13% presents a high vulnerability. In addition, a thematic map was made with the Geographic Information System, what expresses its seismic vulnerability by levels whose identification is made through a color scale. As a complement, a Soil Mechanics Study was prepared, obtaining allowable load capacities of the soil between 0.64 kg/cm² and 1.00 kg/cm².

Keywords: seismic vulnerability; vulnerability index; adobe; masonry; reinforced concrete; GIS

1. INTRODUCCIÓN

Los sismos son fenómenos extraordinarios de la naturaleza capaces de ocasionar daños materiales y pérdidas de vidas en poco tiempo generando así devastadoras consecuencias (Kawamura, et al., 2012).

El Cinturón o llamado también Anillo de Fuego del Pacífico, es uno de los sectores más vulnerables sísmicamente, convirtiéndose en la línea de falla más activa. En esta zona, se genera alrededor del 90% de la actividad sísmica mundial (Freitas, et al., 2019).

*oscarcervera96@gmail.com
Recibido: 05/11/2022
Aceptado: 17/04/2023
Publicado en línea: 01/08/2023
10.33333/tp.vol52n1.10
CC 4.0

En Sudamérica, la Cordillera de los Andes se extiende, formando montañas en serie que recorre los territorios de Bolivia, Ecuador, Perú, Venezuela, Argentina, Chile y Colombia. Esta conformación de montañas y ciertos volcanes obedecen a la subducción que tiene la Placa de Nazca en su encuentro con la Sudamericana; considerada una zona altamente sísmica debido al rozamiento que se produce en estas (Sarria, 1995). Como el suceso del terremoto de Pisco acontecido en agosto de 2007, la cual tuvo una magnitud 7.9 Mw y con una profundidad de 40 Km., produjo el deceso de 519 personas y más de 655 edificaciones afectadas en este suceso catastrófico (Zavala, et al., 2009).

Debido a que las edificaciones están expuestas a sufrir daños por los eventos sísmicos, los ingenieros expertos en la materia se vieron comprometidos a realizar técnicas y metodologías simplificadas para evaluar la vulnerabilidad sísmica (Cunalata y Calza, 2022).

Una de estas metodologías será el método del “*Índice de vulnerabilidad*”, asimismo llamado método italiano, en el cual se describen parámetros relacionados a evaluar propiedades estructurales y no estructurales de una estructura (Benedetti y Petrini, 1984). Por ese mismo año, la metodología fue elegida por un organismo italiano llamado Grupo Nacional de Defensa contra Terremotos (GNDT), para evaluar subjetivamente edificaciones existentes apoyándose en cálculos simplificados para diagnosticar su vulnerabilidad pre o post sismo (GNDT, 2007).

Cabe mencionar que esta metodología se ha aplicado en diferentes ciudades y países como Ecuador, Colombia, España, Italia, Croacia, como se indica en varios estudios (Cardinali, et al., 2019; Nikolić, et al., 2021; Leggieri, et al., 2022). En Perú su aplicación se ha dado en ciudades como Lima, Chiclayo, Jaén, La Libertad, Cajamarca, Ayacucho. Siendo este uno de los métodos más aplicados en el mundo, debido a su simplicidad en clasificar la vulnerabilidad de la edificación mediante un índice debido a sus características estructurales y físicas cualitativamente (Ferreira, et al., 2019).

Si bien es cierto el enfoque que presenta el método italiano, puede describirse como poco confiable, puesto a que se basa en la observación de parámetros, estos datos pueden ser limitados o inexactos porque no se cubre con la totalidad de tipologías y parámetros más elaborados que pueden demostrar de una forma más analítica la vulnerabilidad de una estructura. Pese a esto, el método sigue siendo el ideal para estimar la vulnerabilidad en grandes muestras de edificaciones para una ciudad (Moufid, et al., 2020).

En el Perú, las estructuras existentes contemplan materiales como adobe y quincha, siendo estas construcciones de 1 piso y que tienen buenas propiedades acústicas y térmicas pero que son vulnerables a fenómenos naturales (Chacón, et al., 2021). También de ladrillo que actualmente se le conoce como sistema de albañilería con la cual se pueden construir edificaciones de mayor altura, razón por la cual, este material y sistema es el más utilizado por la población para edificaciones comunes (Shigyo, 1991). Y de concreto armado cuyos sistemas de muros estructurales, aporticado o dual son

los sistemas estructurales más utilizados para edificaciones esenciales, cabe mencionar que para zonas sísmicas el sistema aporticado es más susceptible a sufrir daños (Lara, et al., 2018).

Históricamente, la zona norte del Perú se ha visto afectada por periodos de precipitaciones de gran intensidad provocadas por fenómenos “El Niño”, “La Niña” y “El Niño Costero”, precisamente este último, se presentó desde diciembre del 2016, hasta mayo del 2017 (DIHIDRONAV, 2017). Como es sabido las edificaciones han sufrido los estragos que deja las prolongadas horas de lluvia, lo cual genera inundaciones. Es por ello que en el distrito de Lambayeque, 330 viviendas colapsaron, 777 fueron declaradas inhabitables y 937 viviendas resultaron con algún tipo de afectación (INDECI-COEN, 2017). Considerando que especialmente las edificaciones de adobe resultan seriamente afectadas a la exposición prolongada de lluvias, al tener la base de los muros inundados, generan erosión y disminución de sección lo que conlleva a disminuir su resistencia y el posterior colapso parcial o total (San Bartolomé, et. al., 2010), generándose vulnerabilidad.

Sumado a esto, estudios afirman que frente a la costa del país existe un silencio sísmico importante, esto genera un acoplamiento sísmico en el cual se estima terremotos de gran magnitud, por lo cual para el norte del Perú se prevé un sismo de 7.5 Mw dado que en años pasados hubo sismos de tal magnitud (Villegas-Lanza, et al., 2016).

En la actualidad, mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG), se puede analizar datos a gran escala con el propósito de relacionar estadísticas de cada parámetro y establecer su vulnerabilidad de las edificaciones (Zanazzi, et al., 2019). En el entorno SIG, se integra la información georreferenciada permitiendo la ubicación rápida de los resultados y los procedimientos de evaluación (Leggieri, et al., 2022).

Es así que, Nikolić, et al. (2021), en su interés por establecer la vulnerabilidad sísmica en la costa de Croacia, utilizaron la metodología italiana para evaluar edificaciones históricas en el centro de la ciudad, siendo estos de mampostería. Se obtuvieron resultados con niveles medio y alto de vulnerabilidad en su mayoría, esto debido a que fueron construidos con muros de mampostería suelta, sin elementos de confinamiento, además de presentar deficiencias en la conexión muro-techo, por no tener suficiente cantidad de muros en ambas direcciones y tener elementos no estructurales acoplados de manera deficiente. También, se consideran irregularidades en altura y planta. Adicionalmente, para una mejor interpretación de resultados, se integró todo lo recopilado a un SIG mediante el software ArcGIS donde se combinaron datos gráficos georreferenciados con la información de cada parámetro del método, dando lugar a un mapa de vulnerabilidad.

En el mismo contexto, Cardinali, et al. (2019) evaluaron edificaciones de mampostería en Florencia, Italia. Mediante el método del “*Índice de vulnerabilidad*” derivado del GNDT se obtuvo así una vulnerabilidad media. Los edificios se han

dividido según sus características arquitectónicas y tipológicas. En función de su estructura, se ha tenido edificios de mampostería, de concreto armado y edificaciones con tipología mixta. Finalmente, la información de cada edificación se ha recopilado en una base de datos y mediante el SIG se ha georreferenciado la información utilizando el plano catastro de la ciudad.

En este artículo, se aplica el método del “Índice de vulnerabilidad”, debido a los antecedentes de su aplicación a nivel mundial y a nivel de Sudamérica, lo que deja resultados interesantes. Se lo considera apropiado para abarcar una muestra grande de construcciones existentes pertenecientes al distrito de Lambayeque (Perú), teniendo en cuenta que en la zona se aprecian estructuras autoconstruidas, éstas se convierten en un peligro inminente para sus habitantes. El procesamiento de datos recopilados durante una evaluación pre-sismo llevará a mostrar mediante el SIG, un mapa o plano temático que comprende, mediante su índice, la vulnerabilidad de cada edificación.

Este estudio puede considerarse como precedente para el conocimiento público, para fortalecer las medidas preventivas y de mitigación de vulnerabilidad en las edificaciones existentes, y mejorar los procesos constructivos para estructuras futuras.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción y muestra de zona elegida

Esta aplicación del método se dio en el distrito de Lambayeque, perteneciente a provincia y al departamento que tiene igual denominación, localizado en costa norte del Perú.

Con respecto a la Figura 1, se señala la ubicación del distrito de Lambayeque. Especialmente se eligió la zona sur-este, siendo aproximadamente la cuarta parte del territorio edificado del mencionado distrito, puesto que en esta área hay edificaciones que tienen muchos años de antigüedad y que se han construido sin consideración de normas de edificaciones.

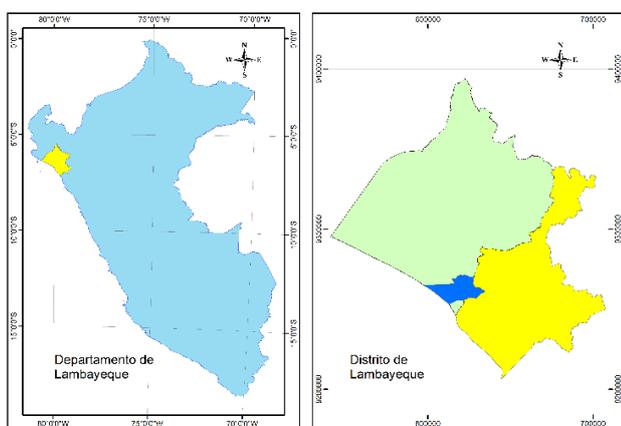


Figura 1. Ubicación del distrito de Lambayeque

En la zona de estudio, se inventariaron 3 677 estructuras de diferente tipología debido a la diversificación de materiales y procesos constructivos que se aplican en la ciudad.

Mediante criterios de selección, se consideraron como criterios de inclusión las 4 tipologías descritas: construcciones de adobe, albañilería no confinada, albañilería confinada y concreto armado, las mismas que se constituyen como población de estudio 3 054 edificaciones existentes. Mientras que 623 restantes no se consideraron debido a los criterios de exclusión: edificaciones de albañilería armada, tapial, quincha, madera, drywall, acero estructural, sistemas mixtos, zonas arqueológicas y lotes: cercados, en proceso de construcción y sin construir.

Conociendo la población, se decidió tomar una muestra no probabilística censal, este tipo de muestra infiere en seleccionar todas las unidades de investigación como muestra Ramírez (1999), es por ello que la muestra será el 100% de la población de estudio.

La Figura 2 muestra una construcción típica en adobe de un piso. En la cubierta, suelen presentar calaminas de fibrocemento, madera, metal o plástico, equivalente a un diafragma flexible. Suelen tener muros de 17 cm (aparejo de sogá) o 34 cm (aparejo de cabeza) habitualmente dañados en la parte inferior debido al salitre y/o humedad, generadas principalmente por la acumulación de lluvias eventuales o por precipitaciones extraordinarias ocasionadas por “El Niño Costero” en el 2017 (DIHIDRONAV, 2017). El efecto combinado de estos agentes suele provocar erosión en la base de los muros. Este tipo de edificaciones es un ejemplo de construcción con vulnerabilidad sísmica alta por falta de contrafuertes, inadecuados arriostres horizontales, y por los efectos de los agentes meteorológicos mencionados así como por la antigüedad, los cuales no cumplen con los requisitos y criterios de la Norma Técnica E.080 (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017).



Figura 2. Edificación de adobe

La Figura 3 es una muestra de las construcciones típicas de albañilería no confinada existentes en la zona, las cuales pueden tener muros de 13 cm (aparejo de sogá) o 23 cm (aparejo de cabeza) que no se encuentran totalmente confinados, no bordeándose así los cuatro lados con elementos de concreto armado como vigas y/o columnas, se observa la unión de los muros dentados inadecuadamente. En su mayoría suelen tener cubiertas de calamina, lo que se considera un techo flexible, y en otros casos tienen losa aligerada

convirtiéndose así un peligro inminente al percibirse un sismo de moderada magnitud, las cuales son, en su mayoría estructuras de un solo piso.

La Figura 4 muestra las construcciones típicas de albañilería confinada del distrito, las cuales varían respecto a la tipología anterior en que éstas si confinan sus muros. En su mayoría suelen tener techos de losa aligerada y tener una azotea de cubiertas de calamina.



Figura 3. Edificación de albañilería no confinada



Figura 4. Edificación de albañilería confinada

Como última tipología se tiene construcciones de concreto armado existentes en el distrito, teniendo como sistema estructural los pórticos de concreto armado para zonas con poca sismicidad, o en otros casos también se incluye placas o muros estructurales para zonas con alta sismicidad, como se muestra en la Figura 5. La tabiquería suele estar arriostrada por columnetas para evitar los casos de columnas cortas.

2.1 Toma de datos

Para identificar los lotes, se pidió como referencia el plano catastral a la municipalidad del distrito que data del año 2020, para proceder a actualizarlo realizando un reconocimiento de campo mediante visitas al lugar e imágenes aéreas satelitales.

Para la recolección de datos, primeramente, se recorrió “*in situ*” todas las edificaciones. Además, se complementó con la utilización del Google Earth con la opción del Street View que data de los años 2013-2015 para ver algún cambio estructural

de las edificaciones con respecto a las actuales, procediendo con el llenado de fichas de observación las cuales tienen elementos de evaluación y descripción de los parámetros por cada tipología existente en el área evaluada.

Así mismo, estos datos se plasmaron en hojas de cálculo Excel, para luego proceder a una recopilación masiva y ordenada de la información de cada edificación.



Figura 5. Edificación de concreto armado

2.2 Estudio de Mecánica de Suelos

Para conocer las condiciones a las que están expuestas las cimentaciones existentes, se realizó un Estudio de Mecánica de Suelos. Esto con el propósito de obtener información de las características físicas y de resistencia del material muestreado a través de ensayos, de lo cual se obtuvo la clasificación unificada de suelos y la capacidad admisible del suelo en el cual se han construido las edificaciones.

Para ello, se tomaron muestras alteradas e inalteradas en 5 calicatas a cielo abierto, distribuidas estratégicamente para abarcar la zona sur-este del distrito de Lambayeque.

2.3 Metodología

El método aplicado en la investigación se derivó del enfoque italiano (Benedetti y Petrini, 1984), complementado con consideraciones en la descripción de los parámetros que utiliza el grupo de investigación científica de Italia (GNDT, 2007), modificando algunos elementos de la metodología original con elementos que se ajustan a la realidad particular de la zona de evaluada.

El método radica en aplicar una ficha de evaluación que contiene 11 parámetros, cada uno de estos evalúa un atributo estructural, y se consideraron aspectos como las irregularidades en altura y planta, sistema constructivo, estado de los materiales, entre otros.

La Tabla 1 tomada de Benedetti, et al. (1988), muestra las clases o escalas de gradación desde un nivel A (si es que se ajusta a cumplir de manera óptima el parámetro) hasta un nivel D (si no cumple favorablemente) en edificaciones de

mampostería con tipologías como adobe, albañilería no confinada y albañilería confinada, para cada parámetro correspondiente.

En Tabla 2 propuesta inicialmente por Gavarini y Angeletti (1984), se muestra las clases desde un nivel A (óptimo) hasta un nivel C (desfavorable) en construcciones de concreto armado, que engloban un valor numérico (K_i); y un coeficiente de ponderación (W_i) que es un valor único propio que establece la importancia relativa de cada parámetro.

Tabla 1. Vulnerabilidad para mampostería

Parámetros	K_i				W_i
	A	B	C	D	
1. Tipo y 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	1,50
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	0,50
7. Configuración en elevación	0	5	25	45	1
8. Distancia máxima entre 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

Tabla 2. Vulnerabilidad para concreto armado

Parámetros	K_i			W_i
	A	B	C	
1. Tipo y organización del sistema resistente	0	1	2	4
2. Calidad del sistema resistente	0	1	2	1
3. Resistencia convencional	-1	0	1	1
4. Posición del edificio y cimentación	0	1	2	1
5. Diafragmas horizontales	0	1	2	1
6. Configuración en planta	0	1	2	1
7. Configuración en elevación	0	1	3	2
8. Distancia máxima entre muros	0	1	2	1
9. Tipo de cubierta	0	1	2	1
10. Elementos no estructurales	0	1	2	1
11. Estado de conservación	0	1	2	1

En el parámetro uno, se verifica si la edificación ha sido estructurada correctamente, bajo supervisión profesional. Se verificó que exista la unión entre paredes perpendiculares, asegurando un comportamiento encajonado o cerrado de la estructura.

En el parámetro dos, se evalúa el estado en que se encuentran los muros que resisten las cargas, material empleado y calidad del mortero en juntas (mampostería), para concreto armado se evalúa la calidad de ejecución de elementos estructurales.

En el parámetro tres, se valora la resistencia que puede representar el sistema resistente de muros en sus dos

direcciones posibles (mampostería), y de elementos estructurales (concreto armado).

En el parámetro cuatro, se observa la situación del terreno en la cual se ha edificado, como presencia de humedad y/o sales, desniveles, pendientes. Así como tener en cuenta la capacidad de carga admisible del suelo.

En el parámetro cinco, se evalúa si la edificación cuenta con diafragma rígido (losa aligerada o maciza), de ser así, esta debe estar conectado de manera correcta a elementos como columnas y vigas.

El sexto parámetro, verifica la geometría en planta de las estructuras, esto puede lograrse con una relación largo-ancho, siendo las estructuras más adecuadas si tienen forma rectangular o cuadrada.

En el parámetro siete, se verifica que no exista irregularidad en altura, con masa abundante en los pisos superiores y con poca masa en el piso inferior.

En el parámetro ocho, se indica vulnerabilidad sísmica si los muros se encuentran ampliamente espaciados.

En el parámetro nueve, se debe tener en cuenta la estabilidad y conexión de la cubierta ya sea de fibrocemento, madera, metal o plástico.

En el décimo parámetro, se observan que las cornisas, parapetos, tanques elevados tengan una conexión adecuada.

En el parámetro once, se evalúa las condiciones actuales de la estructura de acuerdo a su antigüedad, así como la eficiencia del proceso constructivo.

Por lo consiguiente, se expresa un Índice de Vulnerabilidad (IV) siendo un caso exclusivo tanto para edificaciones de albañilería, así como para las de adobe como lo expresa Ecuación (1). Teniendo índices de entre 0 a 382,50. Se considera menos vulnerable cuando el índice tiende a cero y más vulnerable conforme el índice aumenta.

$$IV = \sum_{k=1}^{11} K_i * W_i \quad (1)$$

Así mismo, el IV se encuentra expresado para edificaciones de concreto armado como Ecuación (2). Teniendo índices de entre 0 a 94,12.

$$IV = 100 * \frac{(\sum_{k=1}^{11} K_i * W_i) + 1}{34} \quad (2)$$

Finalmente, se procede a normalizar el IV para cada edificación, obteniendo el Índice de Vulnerabilidad Normalizado (IVN) con niveles desde cero (0) hasta cien (100). Donde el valor mínimo significa un edificio menos vulnerable y el valor máximo un edificio más vulnerable, esto posibilitará la identificación de rangos. Para una mayor identificación de niveles se establecen las siguientes categorías

de vulnerabilidad sísmica: baja (menor que 20); media (20 hasta menor que 40) y alta (40 a 100).

2.4 Base de datos en SIG

Después de haber elaborado las hojas de cálculo en Excel que incluyen todos los datos de los 11 parámetros por cada edificación, se logra exportar la información total al entorno SIG, por lo que se eligió el software ArcGIS para concretar este procedimiento. Esto sumado a que se actualizó el plano catastral del distrito de Lambayeque en el software AutoCAD, siendo este también exportado al entorno SIG. Dando como resultado la identificación por escala de colores de la vulnerabilidad sísmica en cada edificación. Dicha escala se ve representada por color rojo, amarillo y verde que indican una vulnerabilidad alta, media y baja respectivamente.

Cabe resaltar que la información geográfica referenciada en la base de datos de los softwares mencionados, fueron proyectados dentro del sistema de información geográfica Universal Transversal de Mercador (UTM), perteneciendo a la zona sur-este del distrito de Lambayeque a la Zona 17 Sur.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de la población total se encontraron 3 677 lotes, de los cuales 3 054 eran edificaciones existentes y fueron contemplados como población de estudio puesto que cumplen con los criterios de inclusión: construcciones de adobe, albañilería no confinada, albañilería confinada y concreto armado. Y a su vez, se tomó como muestra el total de la población estudiada, la cual se consideró como una muestra censal.

Para el total de construcciones de la zona sur-este del distrito de Lambayeque, se evaluaron 3 054 edificaciones existentes de las cuales, 477 edificaciones que representa el 15,62% presentan una vulnerabilidad sísmica baja (identificándoseles con color verde), 1 901 edificaciones que representa el 62,25% presentan una vulnerabilidad sísmica media (identificándoseles con color amarillo), y 676 edificaciones que representan el 22,13% presentan una vulnerabilidad sísmica alta (identificándoseles con color rojo), como se muestra en la Figura 6.

Del total de la muestra, 949 lotes son edificaciones de mampostería de adobe, 365 lotes son edificaciones de albañilería no confinada, 1 724 lotes son edificaciones de albañilería confinada, y 16 lotes son edificaciones de concreto armado. Sumando 3 054 edificaciones. Los 623 lotes restantes, se comprobó en el levantamiento de campo que se encontraban en diferentes condiciones a los que se había propuesto en este estudio o eran lotes vacíos. La albañilería confinada se constituye la tipología más usada en el área evaluada, con el 46,89% del total de las estructuras.

Del total de construcciones de adobe, el 64,28% resultan tener un nivel de vulnerabilidad media siendo este nivel el porcentaje más alto, seguido de una vulnerabilidad alta con 35,51% y solo el 0,21% poseen niveles de vulnerabilidad baja.

Del total de construcciones de albañilería no confinada, el 61,92% resultan tener una vulnerabilidad media, completando los resultados con una vulnerabilidad alta con 38,08%, no teniendo edificaciones que presenten vulnerabilidad baja.

Del total de construcciones de albañilería confinada, 61,54% resultan tener una vulnerabilidad media, seguida de un nivel de vulnerabilidad baja con 27,09%, completando el total de edificaciones con un 11,37% que representa una vulnerabilidad baja.

Del total de construcciones de concreto armado, 50,00% poseen una vulnerabilidad baja, complementando la vulnerabilidad media y alta, ambos con 25,00%.

Con respecto al Estudio de Mecánica de Suelos, se realizaron 5 calicatas a cielo abierto con una profundidad de 1,50 m, en donde se obtuvo diferentes tipos de clasificación de suelo como: arcillas de mediana plasticidad (CL), arcillas limosas de mediana plasticidad (ML-CL), arenas limosas de poca plasticidad (SM-SP), arenas de nula plasticidad (SP), y limos y arenas muy finos (ML). Y con capacidades de carga admisible de entre 0,64 kg/cm² y 1,00 kg/cm². Además de que en 2 calicatas el nivel freático estaba presente a 1,00 m y a 1,40 m de profundidad.

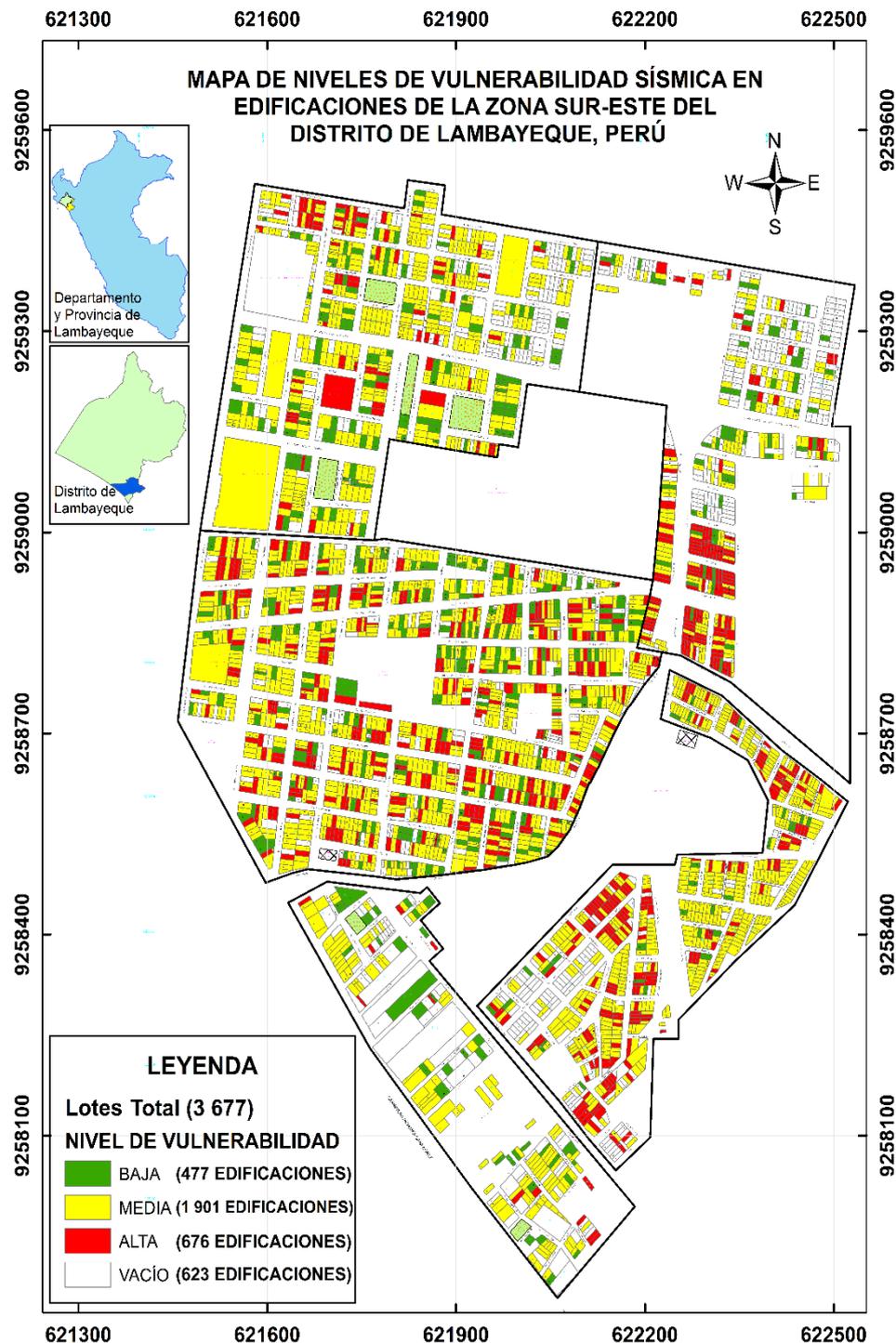
En cuanto a las discusiones, la metodología propuesta en este estudio fue la misma que se presenta en Nikolić, et al. (2021), para edificaciones de mampostería. Es por ello que los parámetros y clases son iguales, la diferencia es en el peso W_i del parámetro uno, aumentándolo de 1,00 a 1,50, se considera la importancia de que la estructura tenga un comportamiento encajonado. Sus resultados indican la presencia de vulnerabilidad media en un 47,00%, vulnerabilidad alta en 25,00%, completando con un 28,00% de vulnerabilidad baja. Para concordar con los resultados del presente artículo, en que las edificaciones tienden a una vulnerabilidad media y alta, debido a las deficiencias constructivas como lo son la carencia de miembros estructurales de confinamiento y baja cantidad de muros en longitud con menor distancia, se suma a esto la antigüedad de la edificación y falta de asesoría profesional.

Para el caso de Cardinali, et al. (2019), se estudian tipologías como: edificaciones de mampostería, edificaciones de concreto armado y tipologías mixtas. Se presenta una similitud en las tipologías estudiadas en la presente investigación. Se deriva en que en la mayoría de estas construcciones predomina la vulnerabilidad media, lo que compatibiliza con los resultados de nuestro estudio.

En el caso de Chacón, et al. (2021), se evaluó un antiguo colegio con muros de adobe y cubiertas de madera en la ciudad de Quito, Ecuador. Al aplicar el método del “Índice de vulnerabilidad” da como resultado que el complejo educativo presenta una vulnerabilidad alta debido a su antigüedad, fragilidad del material como el adobe y muros dañados, pero principalmente a su irregularidad en planta (forma en L) que obedece al parámetro seis por lo que un lado de la edificación centraliza mayor rigidez y/o masa respecto a otro lado de la estructura. Al comparar con las edificaciones de adobe del presente estudio, coinciden en su antigüedad, fragilidad y muros dañados, pero no en su forma irregular en planta puesto

que en general las estructuras de adobe del área estudiada tienen forma rectangular o cuadrada, no presentan así una vulnerabilidad obedecida a ese parámetro.

admisible entre $0,50 \text{ kg/cm}^2$ y $1,00 \text{ kg/cm}^2$. Y en INDECI-PNUD (2004) se obtuvo arcillas y limos de baja plasticidad y arena arcillosa o limosa, con valores de capacidad de carga



Finalmente, en cuanto al estudio del suelo, en CISMID-UNI (2018) se obtuvieron arenas de compacidad suelta y arcillas y/o limos de consistencia blanda, con capacidades de carga

admisible de entre $0,70 \text{ kg/cm}^2$ y $0,90 \text{ kg/cm}^2$. Compatibilizando ambos estudios con los resultados del presente artículo, tanto a nivel de clasificación de suelos, como en los valores de capacidad de carga admisible.

Figura 6. Mapa de niveles de vulnerabilidad sísmica

4. CONCLUSIONES

El método del “Índice de vulnerabilidad”, cuenta con metodología adaptable a la realidad de la ciudad donde se

aplique, considerándose también adecuado para ser utilizado a escala urbana y evaluar a una gran cantidad de estructuras como la finalidad que tuvo este artículo.

Respecto al adobe, registra porcentajes altos de niveles de vulnerabilidad sísmica media y alta puesto que es un material frágil y con el cual se edifica sin la supervisión técnica, es decir se genera autoconstrucción y por ende incorrectos procesos constructivos. Los muros al presentar fisuras se ven muy expuestos a sufrir daños severos, más aún si cuentan con humedad y sales, generadas en su mayoría por las precipitaciones extraordinarias producidas por “El Niño Costero” como lo sucedido en el año 2017, lo cual provoca erosión en la base de los muros, convirtiendo al adobe en un material de mayor vulnerabilidad, lo que expone los muros al colapso si se presenta una acción sísmica.

En cuanto a la albañilería no confinada, se muestra vulnerable sísmicamente en los niveles media y alta, debido a que no se logran confinar los muros con elementos de amarre o confinamiento, quedando estos expuestos al volteo cuando ocurra un movimiento sísmico. Incorrectas prácticas en procesos constructivos también contribuyen a la vulnerabilidad de estas construcciones, situación que no da lugar a una vulnerabilidad sísmica baja.

Respecto a la albañilería confinada, registra porcentaje alto de vulnerabilidad sísmica media debido a la poca densidad en muros para la dimensión más angosta de la edificación. Para el caso de vulnerabilidad sísmica baja, existen edificaciones que principalmente cumplen con las solicitaciones que expide las normas técnicas de edificaciones de Perú.

En el caso del concreto armado, para los registros de vulnerabilidad sísmica baja, se debe a que la mitad de las construcciones son básicamente nuevas y han contado con asesoría profesional para su diseño y construcción, considerando así que han respetado las normas técnicas actuales. Además de no presentar irregularidades en su proceso constructivo. Para el caso de vulnerabilidad sísmica media y alta, se tienen edificaciones antiguas como es el caso de colegios, en los cuales se han diseñado con normas desfasadas y donde se ven errores como columnas cortas y alféizares sin juntas de aislamiento.

De acuerdo al Estudio de Mecánica de Suelos realizado en el área de la zona sur-este del distrito de Lambayeque, se presentan arenas, limos y arcillas de baja a mediana plasticidad de cual sus características son medianamente favorables para la construcción de edificaciones, con respecto a suelos gravosos o rocosos. Considerando también que se presentan capacidades de cargas admisibles bajas, conlleva a tener cimentaciones aptas para este tipo de capacidades. También la presencia del nivel freático alto, que varía en diferentes zonas, puede generar humedad en la base de las edificaciones.

El SIG a través del software ArcGIS permite gestionar la base de datos recopilados y mostrar mediante un plano o mapa, la visualización de niveles de vulnerabilidad sísmica de todas las construcciones existentes por escala de colores, estando así al alcance y comprensión de la población y autoridades competentes para su respectivo análisis.

REFERENCIAS

- Benedetti, D., & Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposte di un metodo di valutazione. *L'industria delle Costruzioni*, 18, 66-74. https://www.researchgate.net/publication/313168279_Sulla_vulnerabilita_di_edifici_in_muratura_proposta_di_un_metodo_di_valutazione
- Benedetti, D., Benzoni, G., & Parisi, M. (1988). Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16(2), 183-201. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160203>
- Cardinali, V., Viti, S., & Tanganelli, M. (2019). Seismic vulnerability of the residential buildings of Florence. *COMPdyn Proceedings*, 3, 5402-5415. <https://doi.org/10.7712/120119.7313.18994>
- Chacón, J., Suquillo, B., Sosa, D., & Celi, C. (2021). Evaluación y Reforzamiento de una Estructura Patrimonial de Adobe con Irregularidad en Planta. *Revista Politécnica*, 47(1), 43-56. <https://doi.org/10.33333/rp.vol47n1.05>
- CISMID-UNI. (2018). *Estudios de microzonificación sísmica y análisis de riesgo en la zona de estudio ubicada en el distrito de Lambayeque*. Municipalidad Provincial de Lambayeque. https://www.munilambayeque.gob.pe/presentacion/Riesgos/TOMO_II/Informe_Tomo%20II.pdf
- Cunallata, F., & Calza, P. (2022). Estado del Arte de Estudios de Vulnerabilidad Sísmica en Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(1), 55-64. <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n1.06>
- DIHIDRONAV. (2017). *Informe Técnico Extraordinario N°001-2017/ENFEN*. Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño". https://www.dhn.mil.pe/Archivos/Oceanografia/ENFEN/nota_tecnica/01-2017.pdf
- Ferreira, T., Mendes, N., & Silva, R. (2019). Multiscale Seismic Vulnerability Assessment and Retrofit of Existing Masonry Buildings. *Buildings*, 9(4), 91. <https://doi.org/10.3390/buildings9040091>
- Freitas, D., França, G., Scherrer, T., Vilar, C., & Silva, R. (2019). Investigating the signatures of long-range persistence in seismic sequences along Circum-Pacific subduction zones. *Brazilian Journal of Geophysics*, 37(4), 409-418. <http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v37i4.2018>
- Gavarini, C., & Angeletti, P. (Julio 21-28, 1984). Assessing seismic vulnerability in view of developing cost/benefit ratios for existing R.C. buildings in Italy [Sesión de conferencia]. *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, I*. San Francisco, CA, Estados Unidos. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/8_vol1_44_5.pdf
- GNDDT. (2007). *Manuale Per Il Rilevamento Della Vulnerabilità Sismica Degli Edifici*. https://protezionecivile.regione.abruzzo.it/agenzia/files/rischio%20sismico/verificheSism/Manuale_e_scheda_GNDDT_I_livello.pdf

- INDECI-COEN. (2017). *Precipitaciones pluviales en el departamento de Lambayeque*. <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/20170914163253.pdf>
- INDECI-PNUD. (2004). *Plan de usos del suelo y medidas de mitigación ante desastres, ciudad de Lambayeque*. http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_lambayeque/lambayeque/lambayeque.pdf
- Kawamura, H., Hatano, T., Kato, N., Biswas, S., & Chakrabarti, B. (2012). Statistical physics of fracture, friction, and earthquakes. *Rev. Mod. Phys.*, 84(2), 839-884. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.84.839>
- Lara, M., Aguirre, H., & Gallegos, M. (2018). Estructuras Aporticadas de Hormigón Armado que Colapsaron en el Terremoto del 16 de Abril de 2016 en Tabuga - Ecuador. *Revista Politécnica*, 42(1), 37-46. https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/961
- Leggieri, V., Mastrodonato, G., & Uva, G. (2022). GIS Multisource Data for the Seismic Vulnerability Assessment of Buildings at the Urban Scale. *Buildings*, 12(5), 523. <https://doi.org/10.3390/buildings12050523>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017). *Norma Técnica E.080 Diseño y Construcción con Tierra Reforzada*. <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Moufid, M., Mohamed, F., & Norooznejad, E. (2020). The seismic vulnerability assessment methodologies: A state-of-the-art review. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 849-864. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.04.001>
- Nikolić, Ž., Runjić, L., Ostojić, N., & Benvenuti, E. (2021). Seismic Vulnerability Assessment of Historical Masonry Buildings in Croatian Coastal Area. *Appl. Sci.*, 11(13), 5997. <https://doi.org/10.3390/app11135997>
- Ramírez, T. (1999). *Cómo hacer un proyecto de investigación* (1ra ed.). Editorial Panapo.
- San Bartolomé, Á., Cabrera, D., & Huaynate, W. (2010). Mejoramiento de las viviendas de adobe ante una exposición prolongada de agua por efecto de inundaciones. *Blog PUCP*. <http://blog.pucp.edu.pe/blog/wp-content/uploads/sites/617/2010/12/Inundaciones-Adobe-P1.pdf>
- Sarria, A. (1995). *Ingeniería Sísmica* (2da ed.). Ediciones Uniandes; Ecoe Ediciones.
- Shigyo, V. (1991). A Methodology for Seismic Vulnerability Estimation and its Application for the City of Lima, Peru. *Journal of the City Planning Institute of Japan*, 26, 217-222. <https://doi.org/10.11361/journalcpj.26.217>
- Villegas-Lanza, J., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J., & Nocquet, J. (2016). Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7371-7394. <https://doi.org/10.1002/2016JB013080>
- Zanazzi, E., Coisson, E., & Ferretti, D. (2019). GIS ANALYSIS OF THE SEISMIC DAMAGE ON HISTORICAL MASONRY SPIRES. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 42(2/W11), 1173-1179. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1173-2019>
- Zavala, B., Hermanns, R., Valderrama, P., Costa, C., & Rosado, M. (2009). Procesos geológicos e intensidad macrosísmica INQUA del sismo de Pisco del 15/08/2007, Perú. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(4), 760-779. <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/877>

BIOGRAFÍAS



Oscar, Cervera, bachiller de la carrera profesional de Ingeniería Civil Ambiental, correspondiente a la Facultad de Ingeniería, perteneciente a Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.



Ángel, Lorrén, egresado de Escuela de Posgrado de Ingeniería Civil en Pontificia Universidad Católica del Perú. Ex docente en Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Ex docente en Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Señor de Sipán y Ex docente en Escuela de Ingeniería

Civil de la Universidad César Vallejo. Docente actual de Escuela de Ingeniería Civil Ambiental en la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.



Ángel, Ruiz, Dr. en Ingeniería Civil en Universidad de A Coruña (Sobresaliente Cum Laude). Especialidad en Geotecnia - Geología Aplicada a la Ingeniería. Director de proyectos de responsabilidad social en Universidad Técnica Particular de Loja. Actualmente en fase de patente de muchos materiales de aplicación en

construcción, procesos industriales y registros de autor informático.