UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Estimación de riesgo sísmico de estaciones de bombero de Lima
Metropolitana y Callao mediante observaciones de campo y análisis de
escenarios importantes

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Delgado Pulcinelli, Giancarlos (0000-0002-8284-253X)

Rubiños Bartens, Santos Kevin (0000-0001-7054-6576)

ASESOR

Arana Vásquez, Víctor Ernesto (0000-0003-4838-451X)

Lima, 01 de setiembre de 2019

DEDICATORIA

A nuestros padres y hermanos: por ser nuestros guías y por sus enseñanzas.

A nuestras familias y amigos.

AGRADECIMIENTOS

Expresar nuestro enorme agradecimiento a nuestras familias, por el apoyo incondicional, ánimo y fuerza que nos dieron durante todo el proceso y sin los cuales no hubiera sido posible realizar nuestra tesis.

A nuestro asesor y profesor, el Ing. Víctor Arana Vásquez, por brindarnos todo el apoyo necesario y enseñanzas para lograr este proyecto y ser nuestro guía en la investigación y en todo momento.

A nuestros compañeros y amigos, por siempre brindar apoyo anímico para poder sacar adelante nuestro proyecto.

Finalmente, brindar especial agradecimiento a la Compañía de Bomberos Voluntarios del Perú por su muy generoso apoyo y atención para poder realizar nuestra investigación. Agradecer a todos los bomberos de las estaciones visitadas por su amable atención y confianza.

RESUMEN

En el Perú, los eventos sísmicos siempre han originado grandes pérdidas económicas y humanas. Se ha evidenciado que la primera entidad en responder una emergencia es la Compañía de Bomberos Voluntarios del Perú. Por ello, la infraestructura de las estaciones debe de soportar cualquier evento sísmico para que los bomberos puedan atender las emergencias de manera inmediata. Estudios similares señalan que las infraestructuras de emergencia en Lima y Callao se verían fuertemente afectadas por un evento sísmico de magnitud importante. Para establecer el nivel de riesgo sísmico de las estaciones de bombero y evaluar las posibles consecuencias que podría originar un sismo, se ha recolectado información de las diferentes estaciones de bombero en Lima Metropolitana y Callao. Luego, se hará el análisis de la estructura utilizando la metodología propuesta por el FEMA 274 en su manual HAZUS del año 2011 con el cual se puede obtener el porcentaje de daño que sufriría la estructura frente a un evento sísmico. Considerando que la metodología aplicada corresponde a parámetros de estructuras de Estados Unidos y no de Perú, los resultados obtenidos son una aproximación al comportamiento de las estructuras frente a un sismo y presenta varias limitaciones que serán detalladas a lo largo de la redacción.

Los resultados obtenidos confirmarían el alto riesgo que presentan las estaciones de bombero. Frente al escenario sísmico de magnitud 8.5 se estima que el 30% de la infraestructura de las estaciones de bombero se verían fuertemente dañadas. Habría pérdidas económicas superiores a los 8 millones de soles. Estos valores ayudarían a establecer criterios de decisión y de mejora para las estaciones de bombero más vulnerables y generar un plan de mitigación de posibles desastres.

Palabras clave: Estaciones de bombero; fragilidad estructural; vulnerabilidad; riesgo sísmico; pérdidas económicas.

Estimation of seismic risk of fire stations of Lima and Callao and analysis of important scenarios

ABSTRACT

In Peru, seismic events have always caused great economic and human losses. It has been shown that the first entity to respond to an emergency is the Volunteer Fire Company of Peru. Therefore, the infrastructure of the stations must withstand any seismic event so that firefighters can attend emergencies immediately. Similar studies indicate that the emergency infrastructures in Lima and Callao will be strongly affected by a seismic event of significant magnitude. To establish the level of seismic risk of the fire stations and to evaluate the possible consequences that an earthquake could cause, information has been collected from the different fire stations in Lima and Callao. Then, the analysis of the structure will be done using the methodology proposed by FEMA 274 in its HAZUS 2011 manual with which the percentage of damage that the structure will suffer in the face of a seismic event can be obtained. Considering that the methodology applied corresponds to parameters of structures of the United States and not of Peru, the results obtained are an approximation to the behavior of the structures in the face of an earthquake and present several limitations that will be detailed throughout the writing.

The results obtained confirm the high risks presented by fire stations. In front of the seismic scenario of magnitude 8.5 it is estimated that at least 30% of the infrastructure of the fire stations will be lost. There will be economic losses of over 8 million soles. These values will help establish decision and improvement criteria for the most vulnerable fire stations and generate a mitigation plan for possible disasters.

Keywords: Fire stations; structure fragility; vulnerability; seismic risk; economic losses.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCION.....	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.1.1	Estudios internacionales	1
1.1.2	Estudios nacionales	2
1.2	REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	5
1.3	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	6
1.4	HIPÓTESIS.....	6
1.5	OBJETIVO GENERAL	7
1.6	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.7	DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO.....	7
2	MARCO TEORICO.....	8
2.1	PELIGRO SÍSMICO.....	8
2.2	FRAGILIDAD ESTRUCTURAL.....	10
2.3	EXPOSICIÓN SÍSMICA.....	14
2.4	RESILIENCIA	14
2.5	VULNERABILIDAD SÍSMICA.....	16
2.6	RIESGO SÍSMICO.....	22
3	MATERIAL Y METODOS.....	25
3.1	MATERIAL	25
3.1.1	Población	25
3.1.2	Muestra	25
3.2	MÉTODO.....	29
3.2.1	Nivel de investigación	29
3.2.2	Diseño de investigación.....	29
3.2.3	Variables de estudio y operacionalización	30
3.2.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	30
3.2.5	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	34
4	RESULTADOS.....	35
4.1	INFRAESTRUCTURA ACTUAL DE ESTACIONES DE BOMBERO	35

4.2	CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS	41
4.3	ESTIMACIÓN DE FRAGILIDAD ESTRUCTURAL	44
4.3.1	Desarrollo de curva de capacidad.....	44
4.3.2	Seccionamiento de curva de capacidad en estados de daño	47
4.3.3	Análisis de coberturas metálicas.....	48
4.3.4	Desarrollo de curvas de fragilidad estructural	51
4.4	ESTIMACIÓN DE EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD	52
4.4.1	Estimación de exposición	52
4.4.2	Desarrollo de las curvas de vulnerabilidad.....	54
4.5	ESTIMACIÓN DE RIESGO SÍSMICO	55
4.5.1	Estimación de peligro sísmico.....	55
4.5.2	Evaluación de riesgo.....	61
5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	65
5.1	VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS	65
5.1.1	De la información recolectada.....	65
5.1.2	Del análisis de riesgo sísmico.....	67
5.2	VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS	70
6	CONCLUSIONES	73
6.1	RESPECTO A LA RECOLECCIÓN DE DATOS	73
6.2	RESPECTO A LA ESTIMACIÓN DE FRAGILIDAD ESTRUCTURAL.....	73
6.3	RESPECTO A LA ESTIMACIÓN EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD.....	73
6.4	RESPECTO A LA ESTIMACIÓN DE RIESGO SÍSMICO	74
7	RECOMENDACIONES	75
8	REFERENCIAS	76
9	ANEXOS	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Factores de daño (FEMA, 2011)	20
Tabla 2 Listado de estaciones de bombero a evaluar (Elaboración propia)	27
Tabla 3 Variables involucradas en la investigación (Elaboración propia)	30
Tabla 4 Resumen de levantamiento de información de estaciones de bombero (Elaboración propia).....	36
Tabla 5 Tabla de clasificación de la estructura según material, sistema estructural y altura (FEMA, 2011)	41
Tabla 6 Clasificación de estructura según tipo de uso (FEMA, 2011).....	42
Tabla 7 Clasificación según zona y edad de estructura (FEMA, 2011)	44
Tabla 8 Clasificación de estructura modelo (Elaboración propia)	44
Tabla 9 Parámetros y valores para armar la curva de capacidad de la estructura modelo (Elaboración propia)	46
Tabla 10 Formulas para seccionamiento de curva de capacidad (SEAOC, 1995)	47
Tabla 11 Resistencia última de soldadura en filete (AISC, 2010).....	49
Tabla 12: Resumen del cálculo de la resistencia de la cobertura metálica (Elaboración propia)	50
Tabla 13 Valores para la ecuación de curva de fragilidad (Elaboración propia)	51
Tabla 14 Costo por m ² (Elaboración propia).....	53
Tabla 15 Estimación de áreas mediante Google Earth (Elaboración propia).....	54
Tabla 16 Costo total de estructura modelo (Elaboración propia).....	54
Tabla 17 Resumen de estimación de riesgo sísmico	62
Tabla 18 Resumen de estimación de riesgo de cobertura metálica	63
Tabla 19 Resumen general de pérdidas probables de todas las estaciones analizadas.....	64
Tabla 20 Pérdidas probables totales en las estaciones de bombero ante un evento sísmico raro.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Interfaz de la plataforma SIGRID (CENEPRED, 2016).....	3
Figura 2 Resumen de metodologías para peligro sísmico (Elaboración propia).....	10
Figura 3 Resumen de metodologías para la estimación de fragilidad estructural (Elaboración propia).....	13
Figura 4 Resumen de metodología para estimar resiliencia (Elaboración propia).....	15
Figura 5 Curva de Capacidad bilineal (Bairan, 2014).....	18
Figura 6 Curva de fragilidad discreta y distribuciones de daño (Silva, 2015)	20
Figura 7 Resumen de metodologías para estimación de vulnerabilidad (Elaboración propia)	21
Figura 8 Resumen de metodologías para estimación de riesgo (Elaboración propia).....	24
Figura 9 Organigrama del CGBVP en Callao y Lima Metropolitana (Elaboración propia).....	26
Figura 10 Mapa de ubicación de las estaciones de bombero (Elaboración propia)	28
Figura 11 Diseño de investigación (Elaboración propia)	29
Figura 12 Formato de recolección de datos (Parte 1).....	32
Figura 13 Formato de recolección de datos (Parte 2).....	33
Figura 14 Mapa de estaciones de bombero según año de construcción	38
Figura 15 Mapa de estaciones de bombero según material y sistema estructural	39
Figura 16 Mapa de estaciones de bombero según sistema de techado	40
Figura 17 Mapa de zonificación sísmica UBC para Estados Unidos (UBC, 1997)	43
Figura 18 Mapa de zonificación sísmica para Perú (NTP E.030, 2016)	43
Figura 19 Curva de capacidad bilineal para la estructura modelo (Elaboración propia)	46
Figura 20 Seccionamiento de curva de capacidad (Elaboración propia).....	47
Figura 21 Curva de capacidad ajustada de la cobertura metálica.....	50
Figura 22 Curva de fragilidad para la estructura modelo (Elaboración propia).....	52
Figura 23 Curva de vulnerabilidad de la estación modelo (Elaboración propia)	55
Figura 24 Ubicación del escenario sísmico (Elaboración propia).....	56
Figura 25 Mapa sísmico del Perú (IGP, 2017)	57
Figura 26 Espectro de demanda sísmica para ($M_w=8.5$, $R_{rup}=76.2$ y $H=30$).....	58
Figura 27 Espectro de demanda amplificado	59

Figura 28 Mapa de ubicación de estaciones según tipo de suelo (Adaptado de CISMID, 2013)	60
Figura 29 Intersección de curva de capacidad con espectro de demanda sísmica (Elaboración propia).....	61
Figura 30 Ubicación del punto de desempeño en curva de vulnerabilidad	62
Figura 31 Año de construcción de las estaciones	65
Figura 32 Mapa de sistemas estructurales y material predominante	66
Figura 33 Gráfico de costo de estructuras	67
Figura 34 Mapa de riesgo sísmico de estaciones de bombero de Lima y Callao	68
Figura 35 Mapa de riesgo sísmico de coberturas metálicas en estaciones de bombero	69

1 INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

1.1.1 Estudios internacionales

- A) Evaluación del desempeño de estaciones de bombero en el condado de Shelby, Tennessee – H. Hwang, et al.

El estudio presenta una evaluación del desempeño sísmico de las estaciones de bombero en el condado de Shelby, Tennessee. Se recolectó información de 71 estaciones de bombero y se implementó en una base de datos usando el programa *Professional MapInfo*. La aceleración máxima del suelo fue resultado de dos escenarios sísmicos con magnitudes de 6.5 y 7.0, fueron estimadas para las estaciones evaluadas. Además, las curvas de fragilidad de varios tipos de estructuras fueron establecidas en base de la información de fragilidad disponible. Usando las curvas de fragilidad se determinó el daño esperado en todas las estaciones de bombero a causa de los escenarios sísmicos propuestos. Los resultados obtenidos indican que la mayoría de las estaciones sufrirán un daño moderado a intenso y se espera que queden fuera de operación. En conclusión, las autoridades deben tomar acciones apropiadas para mitigar los riesgos en las estaciones de bombero (Hwang, Lin, & Huo, 1997).

- B) Evaluación probabilística del riesgo sísmico usando CAPRA: Aplicación a la ciudad de Barcelona, España – M. Marulanda, et al.

El estudio realizado en Barcelona, España se elaboró con el fin de determinar el riesgo sísmico de las diferentes estructuras de la ciudad mediante la aplicación de métodos probabilísticos utilizando el programa CAPRA formulado por el FEMA 356. El programa evalúa y representa los diversos riesgos latentes, incluye el análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgo y a su vez los puede representar en un mapa. En el estudio se evaluaron más de 70,500 edificaciones, clasificándolas por el tipo de material, número de pisos, antigüedad, entre otros parámetros. Como resultado se obtuvo que ante un sismo de magnitud 6.56 M_w la ciudad sufriría una pérdida económica de alrededor 6,000 millones de euros, que equivale a un 21% del valor de la ciudad (Marulanda, Carreño, Cardona, Ordaz, & Barbat, 2013).

- C) Evaluación del daño sísmico considerando las características de eventos pasados en América del Sur – M. Villar-Vega y Vitor Silva.

Los autores plantearon la evaluación del daño sísmico analizando seis eventos sísmicos ocurridos en Latino América (Armenia, Colombia 1999; Arequipa, Perú 2011; Pisco, Perú 2007; Maule, Chile 2010; Salta, Argentina 2015 y Muisne, Ecuador 2016). Se evaluaron todas las estructuras de las ciudades elegidas e información que se obtuvo de los censos realizados en cada país. Las edificaciones se clasificaron según su material predominante. Se definió el modelo de exposición en base al tipo de material predominante de las estructuras de cada país. Luego se planteó el modelo de fragilidad, el cual fue desarrollado con el proyecto SARA. Así mismo, utilizando un análisis de tiempo historia no-lineal se halló el desplazamiento máximo espectral y se definió el estado de daño. Con esta información y junto con la aceleración máxima del suelo se graficaron las curvas de vulnerabilidad según el material de la edificación. Por último, se definió la vibración del suelo. Con esto, se determinó cuál sería el daño que sufrirán las estructuras ante un sismo y cuál es el tipo de material más vulnerable. Este estudio se realizó para cada una de las ciudades mencionadas (Villar-Vega & Silva, 2017).

1.1.2 Estudios nacionales

A) Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres (Sigrid) – CENEPRED

El estudio más completo y destacable es el elaborado por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastre (CENEPRED). Esta entidad elaboró una plataforma en línea nombrada SIGRID (Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres) en la cual se puede visualizar la información relacionada a los diferentes riesgos que afectan el país representándolos en mapas (CENEPRED, 2016). Los principales riesgos que muestra son: sísmicos, lluvias, heladas, crecidas de río, huaicos, entre otros. En la figura 1 se muestra la interfaz de la plataforma SIGRID.

Figura 1 Interfaz de la plataforma SIGRID (CENEPRED, 2016)

En la plataforma se pueden encontrar diversos estudios realizados por otras entidades, tal como el CISMID (Centro Peruano Japonés de Investigación Sísmica y Mitigación de Desastres) que ha realizado estudios de vulnerabilidad y peligrosidad. En dichos estudios se utilizaron la metodología propuesta por Eduardo Miranda para la determinación rápida del desplazamiento máximo de las estructuras. Para el análisis, se identificaron y evaluaron las edificaciones esenciales, tales como colegios, hospitales, entre otros; así también como estructuras culturales como iglesias, monumentos, etc. En la mayoría de los distritos analizados se encontró que la mayoría de las edificaciones presentaban un nivel de vulnerabilidad bastante elevados (CISMID, 2014).

B) Estudio del Sistema de Información de Recursos para la Atención de Desastres en Lima y Callao (SIRAD) – INDECI y PNUD

El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) desarrolló junto con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) el estudio SIRAD (Sistema de Información de Recursos para la Atención de Desastres para Lima Metropolitana y la región de Callao) en el cual se muestra una base de datos geo-referenciada de todos los recursos de respuesta ante un sismo con el cual se busca reducir la vulnerabilidad de la región (INDECI-PNUD, 2011). En el estudio se analizan diversos tipos de vulnerabilidad (social, económica, estructural, entre otras).

C) Proyecto SATREPS (Fortalecimiento de Tecnología para Mitigación de Desastres por Terremoto en el Perú) – CISMID

El proyecto SATREPS consiste en la investigación de tecnologías para la mitigación de desastres por terremoto y/o tsunamis. Para poder llevar a cabo la investigación las diferentes disciplinas se agruparon en cinco grupos: Sismología y Geotecnia, Tsunamis, Edificios, Estimación de daños y Administración del proyecto y Plan de mitigación. En el grupo de Sismología y Geotecnia, se realizó el estudio de microzonificación sísmica. Para ello se realizaron ensayos de penetración estándar (SPT) en diversos puntos. Con la información obtenida se planteó el mapa de microzonificación geotécnica, el cual clasifica el suelo en cinco tipos, siendo el más crítico el tipo V.

El grupo de evaluación de tsunamis realizó la simulación de cómo se propagaría un tsunami en el litoral y cuáles serían las principales zonas afectas. Con la información obtenida del primero grupo se elaboró el mapa de inundación y rutas de evacuación.

En el grupo de edificios se evaluó los materiales usados en las construcciones peruanas. Se evaluaron todas las estructuras, clasificándolas por material y sistema estructural. También se identificaron algunos edificios históricos para evaluar el riesgo sísmico, obteniendo un mapa de riesgo sísmico para la ciudad de Lima. Por último, se evaluaron diferentes métodos de reforzamiento de estructuras.

En el grupo de evaluación de daños se elaboraron curvas de fragilidad en base a la información del grupo de edificios. Con dichas curvas se pudo estimar el daño o pérdidas que se sufrirán ante un evento sísmico (CISMID, 2014).

D) Evaluación probabilística del riesgo sísmico de escuelas y hospitales de la ciudad de Lima – Sandra Santa Cruz

Sandra Santa Cruz (2013) realizó un estudio para determinar el riesgo sísmico de colegios. En dicha investigación se evaluaron poco más de 1500 colegios de Lima analizando la estructura de cada colegio, se observó que la estructura de la mayoría de los colegios ha sido construida con consideraciones sísmicas obsoletas por lo que presentan un alto riesgo sísmico. En la investigación se utilizó la evaluación de pérdidas probables con ayuda de la plataforma CAPRA-GIS. Como resultado se pudo afirmar que la gran mayoría de colegios presenta una estructura deficiente y con altas probabilidades de fallar ante un evento sísmico (Santa Cruz Hidalgo, 2013).

E) Evaluación probabilística del riesgo sísmico de hospitales en Lima con plataforma CAPRA – Juan Palomino y Rodrigo Tamayo.

Una investigación similar fue la realizada por Juan Palomino y Rodrigo Tamayo (2016). En su investigación hicieron el análisis probabilístico con ayuda de la plataforma CAPRA para evaluar los hospitales de Lima, teniendo como criterio de elección que estas son estructuras esenciales y que deben de estar operativas en caso de un evento sísmico. Se lograron evaluar 41 hospitales. Se analizaron los parámetros de peligro, exposición y vulnerabilidad sísmica para concluir en la estimación del riesgo. Como resultado se muestra cuál sería la pérdida esperada por escenario (ESL) y la pérdida anual esperada (PAE) por cada hospital mostrando que la gran mayoría de hospitales presentan grandes pérdidas en caso de sismo (Bendezu & Ly, 2016).

1.2 Realidad Problemática

La labor de los bomberos es indispensable en todo país sobre todo si se trata del rescate después de un desastre natural como lo es un sismo de gran magnitud. Es indispensable que las estaciones de bombero queden operativas luego de un desastre. La mayoría de los países latinoamericanos han sufrido a lo largo de su historia eventos sísmicos de gran magnitud y en todos, el cuerpo de bomberos ha respondido con lo que ha podido. Sin embargo, no en todos los casos los bomberos pueden ejercer su labor.

En el terremoto que azotó a Valparaíso, Chile el 27 de febrero de 2010 se determinó que al menos 98 cuarteles resultaron dañados, de los cuales 75 tuvieron que ser reconstruidos (Junta Nacional Bomberos de Chile, 2015). Mientras que en 2016, después del terremoto que azotó Muisne, Ecuador, se informó que en las estaciones de bombero no estaban contempladas dentro de lo que rige la Secretaria de Gestión de Riesgos, lo cual dificultó el accionar de los bomberos (INSARAG, 2016). Colombia en 1999 sufrió un sismo una magnitud de 6.2 en la escala de Richter. La labor de los bomberos fue fundamental para el rescate, sin embargo, una de las estaciones colapsó, falleciendo 5 integrantes del cuerpo de bomberos (Suarez, 2000).

En el Perú, el 14 de agosto de 2007 ocurrió un sismo de magnitud 7.9 Mw, este sismo ocasionó la muerte de 596 personas (INEI, 2007). El Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú (CGBVP) envió más de 150 rescatistas desde la ciudad de Lima. Se evidenció que en las estructuras en Pisco y en Ica había colapso (OPS, 2010). Por otro lado, en Lima y Callao se tuvieron que atender cerca de 104 emergencias (Tavera, 2008). Frente

a una emergencia el CGBVP cuenta con aproximadamente 120 rescatistas especializados llamados el grupo USAR (Urban Search and Rescue) los cuales son un recurso muy importante ante desastres ocasionado por un sismo (INDECI-PNUD, 2011).

Dentro de este contexto, se considera que la infraestructura de las estaciones de bombero no son las adecuadas para enfrentar un evento sísmico de una magnitud alta al no estar planificadas en un principio para el albergue de equipos de rescate. Las estaciones de bombero no deben tener daños estructurales considerables para que se salvaguarde la vida de los miembros del cuerpo de bomberos y estos puedan atender las emergencias que se originen después del evento sin ninguna dificultad. Es por ello por lo que el Reglamento Nacional de Edificaciones, en su capítulo de diseño sismo resistente, indica que las estaciones de bombero son edificaciones esenciales y se deben diseñar bajo algunos parámetros especiales (RNE NTP E.030, 2016). Sin embargo, esto no se cumple en todas las estaciones, ya que varias de estas se formaron bajo la preocupación de la población al no tener un servicio de emergencia y no por la iniciativa del estado en implementar una. Así mismo, hay alrededor de 16 estaciones que han sido fundadas antes del 1900, mientras que el resto han surgido entre 1900 y 2000 (Vargas, 2009).

Por ello es necesario evaluar la infraestructura de las estaciones de bombero considerando el año de construcción, el tipo de edificación, materiales utilizados y las características de los elementos estructurales a fin de saber el nivel de exposición y vulnerabilidad de las estaciones y de las zonas aledañas a ellas y evitar pérdidas económicas, retrasos en atención a emergencias y pérdidas humanitarias y económicas.

1.3 Formulación del problema

¿Cuál es el nivel de riesgo sísmico de las estaciones de bomberos de Lima Metropolitana y las posibles consecuencias en su entorno luego de un evento sísmico de magnitud importante? ¿Cuántas estaciones quedarían operativas luego de un evento sísmico raro?

1.4 Hipótesis

- Las estaciones de bombero en Lima Metropolitana tienen un alto nivel de riesgo sísmico ante un sismo raro, por lo que se estima que una gran cantidad de estaciones de bombero quedarán inoperativas.

1.5 Objetivo general

Estimar el riesgo sísmico de las estaciones de bomberos en Lima y las posibles consecuencias macro luego de un evento sísmico.

1.6 Objetivos específicos

- Recolectar información de la infraestructura actual de las estaciones de bomberos
- Estimar la fragilidad estructural de las estaciones
- Estimar la exposición y vulnerabilidad de las estaciones
- Evaluar las posibles consecuencias a causa de escenarios sísmicos

1.7 Descripción del contenido

El presente trabajo de investigación consta de seis capítulos. El primer capítulo, Introducción, presenta los antecedentes encontrados, la fundamentación y formulación del problema, la hipótesis, objetivo general y objetivos específicos.

En el segundo capítulo, Marco Teórico, se presenta toda la fundamentación teórica que ayudarán al entendimiento del desarrollo y resultados de la investigación. Así mismo, se hará referencia a algunas metodologías existentes que se pueden aplicar para esta investigación.

En el tercer capítulo, Materiales y Métodos, se presentará la población y la muestra a evaluar. También se detallará la metodología aplicada para la obtención de resultados.

En el cuarto capítulo, Resultados, se presentarán los principales resultados de cada fase de la investigación clasificándolos según los objetivos propuestos.

En el quinto capítulo, Discusión de resultados, se hará la evaluación de los resultados y se discutirán cada uno de ellos.

Finalmente, en el sexto capítulo se presentarán las conclusiones y recomendaciones propuestas para la investigación.

2 MARCO TEORICO

La evaluación del riesgo sísmico de una estructura es un término que ha sido estudiado en muchas partes del mundo incluido el Perú, esto consiste en evaluar el desempeño sísmico de la estructura y analizar qué consecuencias habrá en la estructura ante un eventual sismo. Para poder estimar el riesgo sísmico de la estructura es necesario analizar previamente los factores de peligro, exposición y vulnerabilidad sísmica; y eventualmente el factor de resiliencia (Santa Cruz Hidalgo, 2014). Dichos conceptos serán explicados en el presente capítulo, donde se definirá y se indicará el procedimiento para la estimación de cada uno de ellos para así terminar con la explicación de riesgo sísmico. Así mismo, en el ANEXO I se indicarán definiciones puntuales que ayudarán al entendimiento de la investigación.

2.1 Peligro sísmico

Este concepto hace referencia al grado de amenaza sísmica a la que están expuestas las estructuras. Puede calcularse como la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas, la distancia entre cada fuente y el sitio donde se encuentra la estructura. El peligro sísmico se representa mediante parámetros simples como la intensidad, la aceleración del terreno o el espectro de respuesta. (Alva Hurtado & Escalaya, 2011) .

Metodologías existentes:

Leyes de atenuación

El análisis de peligro sísmico se realiza aplicando la metodología desarrollada por Cornell (1968) en términos probabilísticos, donde fue modificada e implementada en el programa de cómputo RISK y EZRISK por R.McGuire (1976). Esta integra información sismotectónica, parámetros sismológicos y leyes de atenuación regionales para los diferentes mecanismos de ruptura. El resultado de esta técnica es una curva de peligro sísmico, donde se relaciona la aceleración máxima del suelo y su probabilidad anual de excedencia para un determinado lapso de tiempo (Cornell , 1968).

En base a este método se han elaborado diferentes ecuaciones para estimar el movimiento del suelo (GMPE, por sus siglas en inglés) algunas de las más usadas y adaptas por el IGP son las formuladas por Sadigh, et al (1997) y Young, et al (1997). Estas ecuaciones sirven para calcular la pseudo-aceleración y los parámetros utilizados varían según la zona de estudio.

$$\ln(Sa) = C_1 + C_2M + C_3(8.5 - M)^{2.5} + C_4 \ln(R + \exp(C_5 + C_6M)) + C_7 \ln(R + 2) \quad ec. (2.1)$$

$$\ln(Sa) = C_1 + C_2M + C_3(10 - M)^3 + C_4 \ln(R + C_6 \exp(C_7M)) + C_5H + C_7Z_T \quad \text{ec. (2.2)}$$

Donde M es la magnitud del sismo, R es la distancia de la fuente sísmica y los valores C son coeficientes que dependen de la zona, magnitud y periodo de vibración. Con estos valores se pueden construir los espectros para sismos de diferentes magnitudes.

Inspección visual rápida de edificios para potenciales peligros sísmicos

Consiste en designar a ciertas características de los edificios valores cuantitativos a partir de la observación visual desde el exterior, y si es posible, del interior para obtener el nivel potencial de peligro sísmico. En sus inicios fue desarrollado en 1988 por la FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) de Estados Unidos y fue actualizado por el FEMA 154 (*Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*) (FEMA 154, 2005). Este método es aplicado para:

- Edificios de gran antigüedad y contruidos con normas de diseño sismo resistentes no actualizadas y con carencia de detalles específicos.
- Edificios con baja resistencia portante del suelo (blando).
- Edificios con características de desempeño que influncian de manera negativa su respuesta sísmica, por ejemplo, irregularidades en planta y en altura.

El puntaje de peligro estructural se relaciona con la probabilidad de colapso del edificio observado frente a un movimiento sísmico severo, en la cual este puntaje se encuentra dentro del rango de 0 a 7 donde el mayor puntaje representa un mejor desempeño sísmico esperado (ATC, 2002). En el ANEXO II se muestra el formulario de recolección de datos correspondiente para esta metodología.

Norma sismorresistente E.030

Alternativamente se puede usar el método propuesto por la NTE 0.30 para la elaboración aproximada de espectros de respuesta. La norma nos permite calcular la pseudo-aceleración (Sa) para estructuras de diferentes periodos (T). Con la ecuación 2.1 se puede calcular la pseudo-aceleración (Sa) en términos de g .

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} \quad \text{ec. (2.2)}$$

Donde Z es el factor de zona, U es el factor de uso, C es el factor de amplificación sísmica, S es el factor de suelo y R es el coeficiente de reducción de fuerzas (RNE NTP E.030, 2016).

Un resumen de las metodologías descritas se muestra en la Figura 2:

Figura 2 Resumen de metodologías para peligro sísmico (Elaboración propia)

2.2 Fragilidad estructural

Se entiende como la medición de que tan probable mediante métodos estadísticos con data confiable puede llegar a ser el sistema a causa de los peligros sísmicos; para ello se realizan curvas de fragilidad. Estas se definen como la representación gráfica de la función de

distribución acumulada de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño límite específico, dada una respuesta estructural, ante una acción sísmica determinada (FEMA 274, 1997). También expresan la probabilidad acumulada de alcanzar o superar un determinado estado de daño para una tipología estructural dada, expuesta a diferentes niveles de severidad del movimiento sísmico. Permiten efectuar las valoraciones cuantitativas de los grados de daño posibles en las construcciones expuestas a fenómenos naturales o a actividades humanas, así como también las pérdidas esperadas bajo diferentes escenarios de riesgos y para decidir las estrategias de mejora estructural de la edificación (Gutiérrez, 2015). En la figura 3 se muestra el resumen de las metodologías existentes descritas en la siguiente sección.

Metodologías existentes:

Basados en observaciones de campo (Bonett, 2003)

Estos métodos consisten básicamente en las siguientes etapas:

- Se definen el número de sismos de los cuales se cuenta con información de daños. Para cada sismo i , determinamos el parámetro que expresa la intensidad sísmica, por ejemplo, la aceleración máxima del terreno (a_i) registrada en cada zona en estudio se determina según la ecuación 2.2

$$a_i = PGA \text{ donde } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{ec. (2.3)}$$

- Se estima el número de estructuras (N_k) sometidas a un sismo i con una aceleración máxima del terreno igual a a_i .
- Se definen los estados de daño ED_j .
- Se cuantifica el número de estructuras (m_i) que exceden los estados de daño ED_j , para cada a_i . Donde para cada estado de daño ED_j , se estima la probabilidad de falla f_i de la estructura cuando se ve sometida a un sismo con un $PGA = a_i$, mediante la siguiente expresión:

$$f_i = \frac{m_i}{N_k} \quad \text{ec. (2.4)}$$

- Se ajusta a una función de distribución para el grupo de datos obtenidos (a_i, f_i) correspondientes a cada estado de daño ED_j .

Métodos experimentales

Para realizar esta metodología los ensayos resultan ser costosos, pero son las más confiables y a la vez la cantidad de observaciones de daños está limitada al número de pruebas que se realicen. En la actualidad, existen básicamente dos tipos de ensayos que pueden ser utilizados para construir estas curvas de fragilidad:

- Ensayos de carga monotónicamente creciente mediante actuadores de carga o desplazamientos.
- Ensayos sobre mesa vibradora, utilizando registros tiempo-historia de aceleración.

Ambos ensayos proporcionan información de gran utilidad. Chong y Soong en el año 2000 desarrollaron las curvas de fragilidad experimentales para componentes no estructurales. Para ello, determinaron los desplazamientos relativos entre un bloque rígido independiente y una superficie de piso rugosa, a partir de los ensayos realizados en una mesa vibradora utilizando cinco registros de aceleraciones de sismos típicos elegidos aleatoriamente. Se construyeron curvas de fragilidad para desplazamiento relativo entre 0,1 y 3 pulgadas, relacionado con los estados discretos de daño (Chong & Soong, 2000).

Método analítico

Para generar las curvas de fragilidad se calcula la respuesta de una cierta cantidad de estructuras ante diferentes niveles de demanda sísmica. Luego por medio procesamiento estadístico del nivel de daño encontrado se obtienen las curvas de fragilidad. Para obtener la muestra se toman en cuenta las variaciones de las propiedades estructurales, la demanda sísmica y los estados de daño representado por un parámetro indicador del daño (PID). Luego se realiza un análisis dinámico no-lineal y se calcula la respuesta sísmica y se construyen funciones de distribución de probabilidad para el daño alcanzado. Finalmente, en base a estas funciones se logra representar la vulnerabilidad mediante curvas de fragilidad o matrices de probabilidad de daño (*Bonett, 2003*), acotar que esta metodología es una de las usadas por su alto nivel de confiabilidad en sus resultados. En el ANEXO II se muestra de manera esquemática el proceso para determinar las curvas de fragilidad.

Figura 3 Resumen de metodologías para la estimación de fragilidad estructural (Elaboración propia)

2.3 Exposición Sísmica

Se entiende como el área o región expuesta a un fenómeno amenazante. Hace referencia a que tan expuestas estarán las estructuras por estar en riesgo sísmico debido al sitio donde se ubican (entorno y lugar), entre ellas características geodinámicas del suelo, si está en ladera, zona de lluvias, zona potencialmente licuable, etc. (UNDRO, 1979)

El procedimiento para la evaluación propuesta por el GEM es el siguiente:

- Se define una categoría (w_i) para cada uno de los parámetros según la matriz de exposición, anexada en el ANEXO II.
- Luego, se hace una sumatoria (ec. 2.4) de los valores de cada una de las categorías seleccionadas. Esto dará un valor de exposición (E) de rango $0 < E \leq 100$.

$$E = \sum_{i=1}^4 \omega_i \quad \text{ec. (2.5)}$$

Donde los rangos de exposición son los siguientes:

- $E < 30 \%$ BAJA
- $30\% \leq E < 50 \%$ MEDIA
- $E \geq 50 \%$ ALTA

Así mismo, se puede traducir el valor de exposición en términos económicos. Para ello se puede optar por cuantificar el costo de la estructura, por lo que se tendrá que realizar un metrado y análisis de costos de tener toda la información u obtener el costo con un ratio por metro cuadrado.

2.4 Resiliencia

Es el factor que se enfoca en la capacidad de las personas para recuperarse y aprender de una experiencia ante un desastre (Santa Cruz Hidalgo, 2014) . También la definen como la habilidad de las comunidades y hogares para anticiparse y adaptarse a los riesgos y de absorber, responder y recuperarse de los choques y tensiones de manera oportuna y eficaz sin comprometer sus posibilidades a largo plazo. (GOAL, 2015)

La Herramienta para medir la resiliencia frente a desastres ha sido diseñada por personal técnico de campo con experiencia en resiliencia como un medio conciso y fácil de usar para medir dicho nivel en las comunidades mediante la determinación de treinta características

que describen la resiliencia. Esta fue desarrollada en base a la experiencia adquirida en la implementación del programa DIPECHO para Centroamérica en la remota región de La Mosquitia en Nicaragua y Honduras en los últimos años.

La Herramienta para Medir la Resiliencia Comunitaria Frente a Desastres se compone de los siguientes tres instrumentos:

- La Encuesta de Resiliencia Comunitaria Frente a Desastres
- El programa digital
- La guía sobre la herramienta

Con la obtención del análisis anterior proporciona un porcentaje indicativo de resiliencia, basado en la evaluación de los componentes claves de resiliencia. Alternativamente, puede ser utilizada para determinar el nivel de resiliencia. La tabla para la definición de resiliencia se encuentra en el ANEXO II.

Figura 4 Resumen de metodología para estimar resiliencia (Elaboración propia)

2.5 Vulnerabilidad sísmica

La capacidad que tienen las edificaciones de resistir ante un sismo. También hace referencia a la cuantificación del daño o grado de daño que se espera sufra una determinada estructura o grupo de estructuras, sometida o sometidas a la acción dinámica producto de la oscilación del suelo ante una determinada intensidad sísmica (Universidad de Alicante, 2015).

Metodologías existentes:

El método del Índice de Vulnerabilidad

Metodología más utilizada a nivel mundial, definida por la Organización de las Naciones Unidas Desastres (UNDRO) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y establecida por la estimación de víctimas propuesta en el Capítulo XIII del Manual Técnico de la metodología estadounidense HAZUS (Drury, 2000). Aplicados para edificaciones construidas con mampostería confinada, donde considera ciertos parámetros que definen el comportamiento sísmico de las edificaciones (Barbat, Ciacedo, & Canas, 1994). Los parámetros involucrados, también conocidos como ítems de Vulnerabilidad se presentan en el ANEXO II.

Para el desarrollo de este método, primero se procede con el cálculo del Índice de Vulnerabilidad sísmica de acuerdo con la escala de vulnerabilidad de Benedetti-Petrini, el cual resulta de una suma ponderada de los valores numéricos que expresan la "calidad sísmica". A cada parámetro se le atribuye, durante las investigaciones de campo, una de las cuatro clases A, B, C, D (A: óptimo, D: pésimo). A cada una de estas clases se le asigna un valor numérico K_i que varía entre 0 y 45 (Benedetti & Petrini, 1984). En el ANEXO II se muestra la variación del valor K_i .

El índice de vulnerabilidad (VI) se define por la siguiente expresión:

$$VI = \sum_{i=1}^{11} K_i * W_i \quad ec. (2.6)$$

Este método define una escala continua de valores que van desde 0 hasta 382.5, para luego ser dividido por 3.825 para obtener un valor de índice de vulnerabilidad normalizado a un rango de $0 < I_v < 100$. Para analizar los resultados que se tienen en el presente estudio se definen los siguientes rangos de vulnerabilidad:

- VULNERABILIDAD <15 % BAJA
- $15\% \leq \text{VULNERABILIDAD} < 35\%$ MEDIA
- VULNERABILIDAD $\geq 35\%$ ALTA

Luego se estima el daño estructural por medio del uso de funciones de vulnerabilidad que relacionan el Índice de vulnerabilidad (*IV*) con el Índice de daño condicionado sobre las aceleraciones horizontales del suelo debido a un sismo propuesto (Reyes, Sarria, & Maltez, 2001).

El daño se expresa en una escala ($0 < ID < 1$), para la cual se optó por la clasificación de estado de daño propuesta por Park, Ang y Wen en 1993, ligeramente modificada con la intención de que este índice de daño cuantitativo calzara con el rango cualitativo de la metodología *HAZUS* para la estimación de pérdidas humanas (Cardona Arboleda, 2001).

Para reducirlo, las curvas de daño adquieren una forma tri-lineal definido por dos puntos: la aceleración a la cual el daño comienza ($ID > 0$) y la aceleración a que el edificio colapsa completamente ($ID = 1$) (Reyes, Sarria, & Maltez, 2001). En el ANEXO II se muestran la tabla de las ecuaciones para evaluar el daño.

Para realizar lo anterior se prosigue a la selección de sismos para realizar el cálculo del índice de daño de cada vivienda, para ello se escogieron los siguientes sismos:

Sismo de 0.10g, con índice de daño pequeño, un sismo de 0.18g con una probabilidad de excedencia es de 0.02 por año (período de retorno de 50 años), un sismo de 0.30g con probabilidad de excedencia de 0.004 y un período de retorno de 250 años, y un sismo de 0.40g con período de retorno de esta aceleración es de 1000 años (Reyes, Sarria, & Maltez, 2001).

Método analítico para la estimación de vulnerabilidad

La metodología utiliza una serie de fórmulas complejas para la determinación de la curva de vulnerabilidad de cada estructura analizada. La fórmula para hallar dichas curvas es la propuesta por Miranda (1996) y adaptada por Ordaz, et al (2000):

$$E(L|\gamma_i) = 1 - 0.5^\theta; \theta = \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^\rho \quad \text{ec. (2.7)}$$

Donde L es la pérdida, γ distorsión máxima de entrepiso, $\bar{\gamma}$ distorsión máxima asociada a una pérdida de 50% y ρ es un parámetro de vulnerabilidad que define la curvatura.

Para poder obtener estos valores se debe elaborar la curva de capacidad. Para ello se debe calcular el espectro de capacidad que está dado por los pares de valores (D_y, A_y) y (D_u, A_u) que se definen como el punto de fluencia y el punto de comportamiento último respectivamente (FEMA, 2011). Dichos valores se calculan con las siguientes fórmulas (el procedimiento completo se muestra capítulo 4, acápite 4.2 y 4.3):

$$A_y = S_{a_y} = \frac{C_s \gamma}{\alpha_1} ; D_y = S_{d_y} = \frac{S_{a_y}}{(2\pi/T)^2} \quad \text{ec. (2.8)}$$

$$A_u = S_{a_u} = S_{a_y} \lambda ; D_u = S_{d_u} = (\lambda \mu) S_{d_y} \quad \text{ec. (2.9)}$$

Donde C_s es el coeficiente de diseño sísmico, T es el periodo fundamental, γ es la relación entre el esfuerzo de fluencia y el de diseño, λ es la relación entre el esfuerzo último y el de fluencia y μ es la ductilidad. Estos valores pueden ser obtenidos del manual técnico del HAZUS (FEMA, 2011). Cabe indicar que los parámetros utilizados para la elaboración de esta curva corresponde a estructuras con las características del país de origen de la metodología, por lo que, para el caso de la presente investigación, son muy limitados y brindan un resultado general y aproximado.

La curva de capacidad se puede aproximar a un modelo bilineal, la cual se puede observar en la Figura 5.

Figura 5 Curva de Capacidad bilineal (Bairan, 2014)

Con la curva de capacidad se definirán cuatro estados de daño: Leve, Moderado, Severo y Colapso. Luego se procederá a estimar la distorsión máxima asociada a un 50% de daño ($\bar{\gamma}$).

Para calcular el valor de γ se utiliza la fórmula propuesta por Miranda (1996):

$$\gamma = \frac{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 T^2}{4\pi^2 H} Sa \quad \text{ec. (2.10)}$$

Donde T es el periodo fundamental, H es la altura de la edificación y Sa es la pseudo-aceleración espectral. Para el cálculo de los coeficientes β , Aguiar (2006) propuso que se calculen con las siguientes ecuaciones:

$$\beta_1 = \frac{3N}{2N + 1} \quad \text{ec. (2.11)}$$

$$\beta_2 = -0.0231N^2 + 0.3018N + 0.6759 \quad \text{ec. (2.12)}$$

$$\beta_3 = \frac{\mu}{[c(\mu - 1) + 1]^{1/c}} \quad \text{ec. (2.13)}$$

$$\beta_4 = 0.029N + 0.9796 \quad \text{ec. (2.14)}$$

Donde N es la cantidad de pisos de la estructura. Así mismo, para simplificar los cálculos se proponen valores típicos de cada parámetro.

Obtenido los valores de γ y $\bar{\gamma}$, se reemplazan en la ecuación 2.7, con la cual se obtiene la curva de vulnerabilidad para la estructura analizada. En caso la estructura presente irregularidades el valor de Sa tendrá que ser multiplicado por el factor de corrección Φ . Los valores de Φ podrán ser encontrados en las tablas 8 y 9 de la NTP 0.30.

Método empírico para desarrollar curvas de vulnerabilidad discretas

Esta metodología hace uso de las curvas de fragilidad obtenidas para cada una de las estructuras. Para poder transformar la curva de fragilidad a una de vulnerabilidad se debe diferenciar las probabilidades acumulativas para obtener probabilidades discretas de cada estado se dañó (Sadeghi, Ghafory-Ashtiany, & Pakdel-Lahiji, 2015). En la figura 6 se muestra cómo obtener las probabilidades cumulativas de la curva de fragilidad. Las ecuaciones 2.15, 2.16, 2.17 y 2.18 sirven para obtener las probabilidades cumulativas.

Figura 6 Curva de fragilidad discreta y distribuciones de daño (Silva, 2015)

$$P[d_s = \text{Colapso}] = P[d_s \geq \text{Colapso}] \quad \text{ec. (2.15)}$$

$$P[d_s = \text{Severo}] = P[d_s \geq \text{Severo}] - P[d_s \geq \text{Colapso}] \quad \text{ec. (2.16)}$$

$$P[d_s = \text{Moderado}] = P[d_s \geq \text{Moderado}] - P[d_s \geq \text{Severo}] \quad \text{ec. (2.17)}$$

$$P[d_s = \text{Leve}] = P[d_s \geq \text{Leve}] - P[d_s \geq \text{Moderado}] \quad \text{ec. (2.18)}$$

Finalmente, las curvas de vulnerabilidad se pueden obtener con la ecuación 2.19:

$$\text{Vulnerabilidad (\%)} = \sum_{ds=1}^n \{P[ds = DS] \times MDF_{ds}\} \quad \text{ec. (2.19)}$$

Donde MDF_{ds} es el factor de daño promedio y ds es el estado de daño para una intensidad sísmica dada (Sadeghi, Ghafory-Ashtiany, & Pakdel-Lahiji, 2015). Los valores de MDF están establecidos en la metodología del *HAZUS* y se muestran en la tabla 1:

Tabla 1 Factores de daño (FEMA, 2011)

Damage states	Damage factor range (%)	Mean damage factor (%)
None	0	0
Slight	> 0–4	2
Moderate	4–16	10
Extensive	16–84	50
Complete	100	100

Figura 7 Resumen de metodologías para estimación de vulnerabilidad (Elaboración propia)

2.6 Riesgo sísmico

Se define como el daño o las pérdidas que probablemente resultarán de la exposición a peligros sísmicos. Por lo general, se miden en términos de pérdidas esperadas (muertes y lesiones), pérdidas económicas directas (costos de reparación y reemplazo) y pérdidas económicas indirectas (ingresos perdidos durante el tiempo de inactividad debido a daños a la propiedad privada o la infraestructura pública) (FEMA 356, 2000).

Metodologías existentes:

Método por parámetros

El cálculo del riesgo sísmico se expresa mediante la ecuación 20:

$$Riesgo = Amenaza * Vulnerabilidad * Exposición \quad ec. (2.20)$$

Para este cálculo los datos se obtuvieron de la siguiente forma:

Amenaza (A) = 10, obtenido de la tabla de valores definidos por el Instituto Nacional de Estudios Territoriales (INETER).

Exposición (E): el procedimiento de evaluación es el siguiente:

- Se define una categoría para cada uno de los parámetros.
- Luego, se hace una sumatoria (ec. 2.21) de los valores de cada una de las categorías seleccionadas. Esto dará un valor de exposición de rango $0 < E \leq 100$.

$$E = \sum_{i=1}^4 \omega_i \quad ec. (2.21)$$

Los rangos de exposición son los siguientes:

- $E < 30 \%$ BAJA
- $30\% \leq E < 50 \%$ MEDIA
- $E \geq 50 \%$ ALTA

El producto de la ecuación (2.21) se define en una escala de valores desde 0 hasta un valor máximo posible de 100000, el cual se divide por 1000 para obtener un valor de riesgo normalizado a un rango de $0 < R < 100$.

Los rangos del riesgo infraestructural calculado quedan definidos como sigue a continuación:

- RIESGO <15 % BAJA
- $15\% \leq \text{RIESGO} < 30\%$ MEDIA
- $\text{RIESGO} \geq 30\%$ ALTA

Método probabilístico (CAPRA)

El método probabilístico ayuda a medir la probabilidad de excedencia de los valores de pérdida, $v(p)$. En esta metodología, para calcular las pérdidas, la proporción de daño es trasladado a términos económicos multiplicando la proporción de daño por el valor del riesgo. Para ello utiliza diferentes métricas para representar las pérdidas económicas probables (Cardona, et al., 2012), (Bendezu & Ly, 2016), estas son las siguientes:

Pérdida Anual Esperada (PAE):

Es la pérdida que se espera por año debido a los sismos probables en un periodo. Se estima con la ecuación (2.22).

$$PAE_j = \sum_{i=1}^{Ns} (Pr_i(\text{ocurrencia})ESL_{j,i}) \quad \text{ec. (2.22)}$$

Donde, Ns es el número de escenario analizados, $Pr_i(\text{ocurrencia})$ es la probabilidad anual de ocurrencia y ESL es la pérdida por escenario. La probabilidad anual de ocurrencia puede ser estimada con la ecuación (2.23).

$$Pr_i(\text{ocurrencia}) = -\frac{dA}{A} \frac{d\lambda(M)}{dM} dM \quad \text{ec. (2.23)}$$

Donde, A es el área de influencia, λ es la tasa de excedencia y M es la magnitud del escenario.

Pérdida por escenario (ESL):

La pérdida por escenario es el valor esperado de pérdida en una edificación debido a la ocurrencia de un escenario. Este parámetro puede ser calculado con la ecuación (2.24).

$$ESL_{j,i} = \sum_I V_j(I)Pr_{i,j}(I) \quad \text{ec. (2.24)}$$

Donde, V_j es la función de vulnerabilidad de la edificación y $Pr_{i,j}$ es la probabilidad de que la intensidad, en la ubicación j sea I . Con este valor se puede calcular la Pérdida Total por escenario, según la ecuación (2.25).

$$TESL_i = \sum_{i=1}^{Nb} ESL_{j,i} \quad ec. (2.25)$$

Perdida máxima probable (PML):

La pérdida máxima probable representa la cantidad de pérdida anual de excedencia dada, asociada a un periodo de retorno alto. Se puede estimar con la ecuación (2.26).

$$v(p) = \frac{1}{Tr} = \sum_{i=1}^{Ns} (Pr_i(ocurrencia))(TESL_i) \quad ec. (2.26)$$

Donde, $v(p)$ es la tasa de excedencia de pérdidas y Tr es el periodo de retorno de pérdidas.

Figura 8 Resumen de metodologías para estimación de riesgo (Elaboración propia)

3 MATERIAL Y METODOS

3.1 Material

3.1.1 Población

Las estaciones de bombero de Lima Metropolitana y el Callao serán la población por estudiar para la presente investigación. En el Perú existen 184 compañías distribuidas en 25 comandancias. En Lima y Callao hay un total de 55 compañías. Adicionalmente se encuentran registrados aproximadamente 8,500 efectivos dentro de los cuales 4,200 están en Lima y Callao (Castellanos Fernandez, Ruiz Gutarra, & Horna Noriega, 2010).

3.1.2 Muestra

La cantidad de estaciones a evaluar serán de 40 pertenecientes a Callao y Lima Metropolitana. Dentro de estas están incluidas las 4 comandancias de las áreas mencionadas que son la Comandancia Departamental de Callao, Lima, Lima Sur y Lima Norte. Un organigrama de la distribución de las estaciones de bombero se muestra en la figura 9.

La selección de las estaciones ha sido de manera estratégica y se ha basado en varios parámetros para establecer las estaciones más importantes o críticas. Dentro de los parámetros analizados para la selección están:

- Calidad del suelo según microzonificación sísmica.
- Cantidad de población según la densidad poblacional de cada distrito y por metro cuadrado.
- Antigüedad de las compañías.

Los parámetros mencionados han sido traducidos en mapas para poder facilitar la lectura y ubicar de manera más rápida las estaciones a las cuales se hará la inspección. El listado de las estaciones a evaluar se muestra en la tabla 2. En la figura 10 se muestra el mapa de ubicación de las estaciones visitadas.

Figura 9 Organigramma del CGBVP en Callao y Lima Metropolitana (Elaboración propia)

Tabla 2 Listado de estaciones de bombero a evaluar (Elaboración propia)

N°	Co.	Estacion	Distrito	Direccion
1	Comandancia Departamental de Lima	Sede de Comandancia Departamental Lima	Cercado de Lima	Jr. Junin No. 574
2		B-2 Roma	Cercado de Lima	Jr. Junin No. 560
3		B-4 Lima	Lince	Jr. Manuel Candamo
4		B-8 Victoria	La Victoria	Av. Manuel Cisneros No. 597
5		B-14 Internacional	Breña	Jr. Rebeca Oquendo No. 360
6		B-36 Magdalena	Pueblo Libre	Av. Sucre No. 899
7		B-83 San Miguel	San Miguel	Jr. Sucre Cdra. 7
8		B-100 San Isidro	San Isidro	Calle Godofredo Garcia 439
9		B-121 San Juan de Lurigancho	San Juan de Lurigancho	Av. El Bosque No. 339
10		B-127 Salamanca	Ate	Las Dalias No. 180 Parque de Monterrico
11		B-176 El Agustino	El Agustino	Jr. Maria Baldarrago Cdra. 5
12		B-202 Waldo Hernan Olivos V.	Jesus Maria	Jr. Capac Yupanqui Cdra. 16
13	Comandancia Departamental del Callao	Sede de Comandancia Departamental Callao	Bellavista	Av. Alejandro Granda Mz. E Lt. 3
14		B-1 Union Chalaca	Cercado del Callao	Av. Dos de Mayo No. 375
15		B-5 Italia	Bellavista	Av. Alejandro Granda Mz. E Lt. 3
16		B-7 Garibaldi	La Perla	Av. La Marina Cdra. 40
17		B-9 Salvadora Callao	Callao	Jr. Pedro Ruiz Gallo No. 246
18		B-15 Callao	Callao	Jr. Los Heroes No. 151
19		B-18 Peru	Callao	Jr. Puno No. 137
20		B-34 La Punta	La Punta	Av. Bolognesi No. 133
21		B-60 Antonio Alarco Espinoza	Bellavista	Jr. Condores No. 591
22		B-75 Tecnico Lorenzo Giraldo Vega	Ventanilla	Urb. Ex zona comercial Mz. C Lotes 09, 10, 11
23		B-184 Brigadier CBP Alejandro Reyes Leon	Mi Peru	Nuestra Señora de las Mercedes
24		B-207 Adolfo Martin King Leoane	Ventanilla	Av. Panama Mz. K, Lote A
25		B-232 Pachacutec	Ventanilla	Ciudad Pachacutec
26	Comandancia Departamental de Lima Sur	Sede Comandancia Departamental Lima Sur	San Borja	Jr. Durero 284
27		B-6 Garibaldi	Chorrillos	Av. Huaylas No. 298
28		B-11 Cosmopolita	Surquillo	Calle Galeno
29		B-11 Olaya	Chorrillos	Av. Lima No. 227
30		B-28 Miraflores	Miraflores	Av. Mariscal Caceres No. 172
31		B-96 La Molina	La Molina	Av. La Chalaca
32		B-105 Villa el Salvador	Villa el Salvador	Sector 2, Grupo 15
33		B-106 Villa Maria del Triunfo	Villa Maria del Triunfo	Av. Defensores Lima Cdra. 15
34		B-120 San Juan de Miraflores	San Juan de Miraflores	Esq. Paita con Sullana
35		B-134 Santiago Apostol	Santiago de Surco	Monte de los Olivos Cdra. 9
36	Comandancia Departamental	Sede Comandancia Departamental Lima Norte	Los Olivos	Calle 36 Mz. K Lote 15
37		B-65 San Martin de Porres	San Martin de Porres	Jr. San Lucas N° 401
38		B-124 Comas	Comas	Manuel Aranguiri No. 699
39		B-161 Los Olivos	Los Olivos	Calle 36 Mz. K Lote 15
40		B-168 Independencia	Independencia	Jr. Los Tumbos Cdra. 1

Figura 10 Mapa de ubicación de las estaciones de bombero (Elaboración propia)

3.2 Método

3.2.1 Nivel de investigación

La manera de investigación será exploratoria ya que será efectuada sobre un tema poco conocido o estudiado por lo que los resultados obtenidos constituyen una visión aproximada del tema tratado en la presente investigación.

3.2.2 Diseño de investigación

La estrategia para la resolución al problema planteado es de carácter de campo, donde se recolectará la información directamente, sin manipular ninguna variable y luego serán evaluados con determinadas condiciones. La estrategia se puede dividir en cuatro etapas según la figura 11:

- En la primera etapa, se hará la recolección de información relacionada al estudio de riesgo sísmico en edificaciones.
- En la segunda etapa, se establecerá el área de estudio y se hará la recolección de información con las visitas a campo a las diversas estaciones de bombero. Se presentará una base de datos con toda la información obtenida.
- En la tercera etapa, se hará el estudio en gabinete y se estimaran los parámetros de peligro sísmico, fragilidad estructural, exposición y vulnerabilidad. Para el cálculo de fragilidad y vulnerabilidad se aplicará la metodología propuesta por el manual técnico del HAZUS (Se detalla el proceso el capítulo 4, acápite 4.2 y 4.3).
- En la cuarta etapa, se hará la estimación del riesgo sísmico de todas las estaciones de bombero y se consolidaran todos los resultados obtenidos. Se plantearán las conclusiones y recomendaciones.

Figura 11 Diseño de investigación (Elaboración propia)

3.2.3 Variables de estudio y operacionalización

Las variables fundamentales para la definición de los parámetros a analizar derivan principalmente de las características de las estructuras a analizar. Dichas variables se presentan y se describen en la tabla 3. Cabe indicar que la resiliencia no será analizada pues no forma parte del tema de investigación.

Tabla 3 Variables involucradas en la investigación (Elaboración propia)

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Instrumento de Investigación
Dependiente (VP): R: Riesgo Sísmico de estructuras de bombero (Comportamiento de la estructura)	Peligro sísmico	PGA: Aceleración máxima del suelo	m/s ²	Leyes de atenuación
	Exposición	Características de estructura	S/.	Formatos de recolección de datos
	Fragilidad	Curvas de fragilidad	% de excedencia	Manual del HAZUS (Hoja de cálculo)
	Vulnerabilidad	Curvas de vulnerabilidad	% de daño	Manual del HAZUS (Hoja de cálculo)

3.2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos primero se tuvo que solicitar los permisos correspondientes. Para ello se solicitó a la universidad la emisión de cartas de presentación dirigidas al Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú (CGBVP). Presentada la carta, se obtuvo una reunión con el ingeniero Ramiro Alvarado, a quien se le habló acerca de la investigación.

Terminada la reunión, nos emitieron el permiso formal para ejecutar la recolección de datos a todas las estaciones de Lima Metropolitana y Callao. Así mismo, el permiso fue enviado a las 4 comandancias departamentales que abarca el área de estudio para que deriven el permiso al resto de estaciones. La carta presentada al CGBVP y el permiso otorgado por la institución se puede visualizar en el ANEXO III.

Para realizar las inspecciones, se elaboró un formato de recolección de datos, el cual toma en cuenta las variables descritas en el acápite 3.2.3. Así también algunos datos adicionales los cuales nos ayudaran a definir el estado actual de las estaciones de bombero. El formato utilizado se presenta en la Figura 12 y Figura 13. El formato fue adaptado del formato utilizado en la metodología del ATC y de la investigación “*Evaluación probabilística del riesgo sísmico de hospitales en Lima con plataforma CAPRA*”.

Formato de Recolección de Datos de Estaciones de Bombero		Fecha:
1. Información General		
Nombre de la Estación _____ Distrito _____		
2. Características Generales		
Año de Construcción _____	Año Remodelación _____	
Número de Pisos _____	Área aprox. (m2) _____	
Altura Entrepiso (m) _____	Luz mayor (m) _____	
Sótanos _____	Luz de salida (m) _____	
3. Características de la Estructura		
<u>Sistema Estructural:</u>	<u>Material Predominante:</u>	
Pórticos ☐	Concreto ☐	
Pórticos y muros ☐	Acero ☐	
Albañilería reforzada ☐	Madera ☐	
Albañilería ☐	Adobe ☐	
Otros: _____	Otros: _____	
4. Sistema de Techado		
Aligerado ☐	Cobertura ☐	
Macizo ☐	Otros: _____	
5. Irregularidades		
<u>En altura:</u>	<u>En planta:</u>	
Piso blando ☐	Esquinas entrantes ☐	
Discontinuidad vertical ☐	Discontinuidad diafragma ☐	
Irregularidad geométrica ☐	Sistemas no paralelos ☐	
6. Defectos y Daños		
Columna corta ☐	Fisuras en columnas ☐	
Asentamientos ☐	Fisuras en vigas ☐	
Deflexiones excesivas ☐	Fisuras en muros ☐	

Figura 12 Formato de recolección de datos (Parte 1)

7. Datos Adicionales		10. Áreas Libres Exteriores
Cantidad de bomberos	_____	Retiro de entrada principal (m) _____
Cantidad de equipos	_____	Ancho de calle (m) _____
8. Horario de Cuadrillas		11. Observaciones
Horario	Cantidad de Bomberos	
9. Estacionamiento de Equipos		
Exterior	☐	
Interior	☐	
Mixto	☐	
Supervisado por: _____		Firma: _____
Elaborado por: _____		Firma: _____
Elaborado por: _____		Firma: _____

Figura 13 Formato de recolección de datos (Parte 2)

3.2.5 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento de la información se utilizó el programa Excel para poder elaborar la base de datos, con el cual también se elaborarán gráficos que puedan ayudar a un mejor entendimiento de la información y poder obtener porcentajes según los parámetros analizados. También para la elaboración de mapas se utilizó el programa ARCGIS, que por su fácil uso y gran capacidad para almacenar información es una herramienta que potenciara los resultados de la investigación.

Para realizar el análisis de datos se utilizó la metodología propuesta en el manual *HAZUS*, la cual en base a las características de la estructura se puede estimar una aproximación de la curva de capacidad y por ende estimar la curva de fragilidad de la estructura. Posteriormente, a partir de ellas se estimarán las curvas de vulnerabilidad realizando una sumatoria de probabilidades discretas. Luego se estimará el peligro elaborando un espectro de demanda sísmica mediante el uso de las leyes de atenuación propuestas por Young et. Al (1997). Finalmente, se realizará la intersección del espectro de capacidad con el espectro de demanda para obtener el punto de desempeño sísmico de la estructura, con el cual se volverá a la curva de vulnerabilidad para obtener el porcentaje de daño. Todo el procedimiento descrito se realizará a detalle en el capítulo IV.

4 RESULTADOS

En el presente capítulo se mostrarán los resultados obtenidos y se mostrará de manera detallada el procedimiento para poder llegar a ellos. Por temas de limitación de hojas, se mostrarán los cálculos de fragilidad, exposición, vulnerabilidad y riesgo de solo una estación, el cálculo del resto de estaciones se mostrará en la sección de anexos. Se mostrará el desarrollo de la metodología en la estación Independencia N°168.

4.1 Infraestructura actual de estaciones de bombero

Con el uso del formato de recolección de datos se realizó la inspección de las 40 estaciones de bombero. Para cada una de ellas, la información recolectada fue transcrita a un formato digital en Excel y de igual manera se elaboró un panel fotográfico con las fotos más representativas. Por limitaciones de espacio, se presentará una tabla resumen, en la cual se indican las principales características de las estaciones visitadas. En la tabla 4 se muestra el cuadro ya mencionado. Así mismo, se elaboraron mapas de las principales características de las estaciones visitadas, de esta forma se obtiene un resultado más visual y fácil de entender. En las figuras 14, 15 y 16 se muestran los mapas según año de construcción, tipo de estructura y sistema de techado, correspondientemente. La información completa de cada estación junto con el panel fotográfico se muestra en el ANEXO IV.

Tabla 4 Resumen de levantamiento de información de estaciones de bombero (Elaboración

N°	Co.	Estacion	Distrito	Direccion	Fundacion	Construccion	Remodelacion	# Pisos	Area (m2)	Sist. Estr.	Material	Techo	Irregularidad	Daños	# Bomberos	# Equipos	Estacionam.	Costo (\$/.)
1	Comandancia Departamental de Lima	Sede de Comandancia Departamental Lima	Cercado de Lima	Jr. Junin No. 574	2014	1850	NA	2	323	Albañileria	Adobe	Madera	NA	Asentamientos	NA	NA	Interior	S/. 107,875.54
2		B-2 Roma	Cercado de Lima	Jr. Junin No. 560	1866	1850	NA	2	540	Albañileria	Adobe	Madera	NA	Asentamientos	113	4	Interior	S/. 180,349.20
3		B-4 Lima	Lince	Jr. Manuel Candamo	1866	1975	NA	4	375	Pórticos	Concreto	Aligerado	IA	Grietas	40	5	Interior	S/. 1,617,261.00
4		B-8 Victoria	La Victoria	Av. Manuel Cisneros No. 597	1873	1970	NA	2	440	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	IP	Fisuras	30	5	Interior	S/. 544,494.08
5		B-14 Internacional	Breña	Jr. Rebeca Oquendo No. 360	1893	1970	Si	3	557	Pórticos	Concreto	Aligerado	IA	NA	70	5	Interior	S/. 1,960,120.33
6		B-36 Magdalena	Pueblo Libre	Av. Sucre No. 899	1948	2010	NA	1	430	Pórticos	Concreto	Aligerado	NA	Asentamientos	30	8	Interior	S/. 1,113,425.57
7		B-83 San Miguel	San Miguel	Jr. Sucre Cdra. 7	1993	1980	NA	2	620	Muros	Drywall	Cobertura	NA	Fisura en losa	85	4	Interior	S/. 49,545.00
8		B-100 San Isidro	San Isidro	Calle Godofredo Garcia 439	1995	1997	NA	3	525	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	NA	Asentamientos	50	7	Interior	S/. 611,862.44
9		B-121 San Juan de Lurigancho	San Juan de Lurigancho	Av. El Bosque No. 339	1997	1997	Si	1	1600	Pórticos	Madera	Cob. + Alig.	NA	Deflexiones	40	4	Interior	S/. 97,650.00
10		B-127 Salamanca	Ate	Las Dalias No. 180 Parque de Monterrico	1997	2000	NA	3	723	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	NA	Fisuras	40	4	Interior	S/. 433,337.25
11		B-176 El Agustino	El Agustino	Jr. Maria Baldarrago Cdra. 5	2005	2005	Si	2	400	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	NA	Segregacion	50	4	Interior	S/. 281,577.52
12		B-202 Waldo Hernan Olivos V.	Jesus Maria	Jr. Capac Yupanqui Cdra. 16	2013	2013	NA	1	495	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	NA	C. Corta	90	6	Interior	S/. 169,975.58
13	Comandancia Departamental del Callao	Sede de Comandancia Departamental Callao	Bellavista	Av. Alejandro Granda Mz. E Lt. 3	1984	1997	NA	3	1792	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	IP	Infilt.	NA	NA	NA	S/. 1,499,892.64
14		B-1 Union Chalaca	Cercado del Callao	Av. Dos de Mayo No. 375	1961	1961	NA	5	620	Pórticos	Concreto	Aligerado	IP	Fisuras	55	3	Interior	S/. 1,900,227.09
15		B-5 Italia	Bellavista	Av. Alejandro Granda Mz. E Lt. 3	1868	1997	NA	3	1792	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	IP	Infilt.	140	8	Mixto	S/. 1,499,892.64
16		B-7 Garibaldi	La Perla	Av. La Marina Cdra. 40	1873	1999	Si	3	810	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	NA	NA	65	6	Interior	S/. 902,969.42
17		B-9 Salvadora Callao	Callao	Jr. Pedro Ruiz Gallo No. 246	1873	2016	NA	1	1650	Muros	Drywall	Cobertura	NA	NA	60	7	Interior	S/. 57,060.00
18		B-15 Callao	Callao	Jr. Los Heroes No. 151	1864	1956	NA	3	192	Pórticos	Concreto	Aligerado	NA	Infilt.	70	4	Interior	S/. 497,157.47
19		B-18 Peru	Callao	Jr. Puno No. 137	1907	1996	Si	4	735	Pórticos	Concreto	Aligerado	NA	Infilt.	60	6	Interior	S/. 1,903,180.92
20		B-34 La Punta	La Punta	Av. Bolognesi No. 133	1945	1966	NA	2	730	Pórticos	Concreto	Aligerado	IP+IA	Infilt.	50	4	Mixto	S/. 1,890,234.11
21		B-60 Antonio Alarco Espinoza	Bellavista	Jr. Condores No. 591	1972	1987	NA	3	350	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	IP	Infilt.	90	5	Interior	S/. 479,364.21
22		B-75 Tecnico Lorenzo Giraldo Vega	Ventanilla	Urb. Ex zona comercial Mz. C Lotes 09, 10, 11	1986	1997	NA	3	388	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	IP	Infilt.	50	5	Interior	S/. 355,356.48
23		B-184 Brigadier CBP Alejandro Reyes Leon	Mi Peru	Nuestra Señora de las Mercedes	2008	2008	NA	1	825	Muros	Drywall	Cobertura	NA	NA	20	4	Interior	S/. 91,155.00
24		B-207 Adolfo Martin King Leoane	Ventanilla	Av. Panama Mz. K, Lote A	2014	2015	NA	3	1194	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	NA	NA	37	4	Interior	S/. 1,065,475.65
25		B-232 Pachacutec	Ventanilla	Ciudad Pachacutec	2017	2015	NA	1	400	Muros	Drywall	Cobertura	NA	NA	10	2	Interior	S/. 15,725.00
26	Comandancia Departamental de Lima Sur	Sede Comandancia Departamental Lima Sur	San Borja	Jr. Durero 284	2017	1990	NA	3	285.6	Dual	Concreto	Aligerado	NA	Fisuras	NA	NA	NA	S/. 487,361.22
27		B-6 Garibaldi	Chorrillos	Av. Huaylas No. 298	1872	1972	NA	3	284	Pórticos	Concreto	Aligerado	IP	Fisuras	30	4	Interior	S/. 918,604.25
28		B-11 Cosmopolita	Surquillo	Calle Galeno	1877	1998	NA	2	1670	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	NA	NA	30	7	Interior	S/. 769,021.10
29		B-13 Olaya	Chorrillos	Av. Lima No. 227	1890	1915	Si	2	1900	Pórticos	Concreto	Aligerado	NA	Fisuras	70	4	Interior	S/. 258,296.87
30		B-28 Miraflores	Miraflores	Av. Mariscal Caceres No. 172	1939	1980	NA	2	935	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	IA	Fisuras	50	7	Interior	S/. 1,323,058.02
31		B-96 La Molina	La Molina	Av. La Chalana	1995	1995	NA	2	1050	Dual	Concreto	Cob. + Alig.	IP	Columna corta	109	6	Interior	S/. 1,300,773.85
32		B-105 Villa el Salvador	Villa el Salvador	Sector 2, Grupo 15	1996	1994	Si	2	883	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	IP	Columna corta	50	4	Interior	S/. 630,205.68
33		B-106 Villa Maria del Triunfo	Villa Maria del Triunfo	Av. Defensores Lima Cdra. 15	1996	1995	Si	2	2000	Dual	Concreto	Cob. + Alig.	NA	Asentamientos	87	5	Interior	S/. 731,456.72
34		B-120 San Juan de Miraflores	San Juan de Miraflores	Esq. Paita con Sullana	1997	1997	Si	2	1146	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	NA	Columna corta	60	4	Interior	S/. 550,294.00
35		B-134 Santiago Apostol	Santiago de Surco	Monte de los Olivos Cdra. 9	1998	2003	NA	3	476	Dual	Concreto	Aligerado	IP	NA	60	4	Interior	S/. 664,329.73
36	Comandancia Departamental de Lima Norte	Sede Comandancia Departamental Lima Norte	Los Olivos	Calle 36 Mz. K Lote 15	2013	1985	NA	2	1250	Pórticos	Acero	Cobertura	NA	Oxidado	NA	NA	NA	S/. 562,500.00
37		B-65 San Martin de Porres	San Martin de Porres	Jr. San Lucas N° 401	1974	1990	Si	1	1474	Pórticos	Concreto	Cobertura	NA	Columna corta	50	6	Interior	S/. 668,467.88
38		B-124 Comas	Comas	Manuel Aranguiri No. 699	1997	1997	Si	3	600	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	IP	Columna corta	50	6	Interior	S/. 512,619.67
39		B-161 Los Olivos	Los Olivos	Calle 36 Mz. K Lote 15	2000	1985	NA	2	1250	Pórticos	Acero	Cobertura	NA	Oxidado	50	3	Interior	S/. 562,500.00
40		B-168 Independencia	Independencia	Jr. Los Tumbos Cdra. 1	2000	2001	NA	3	240	Pórticos	Concreto	Cob. + Alig.	IP	Fisuras	50	3	Interior	S/. 162,818.42

Figura 15 Mapa de estaciones de bombero según material y sistema estructural

Figura 16 Mapa de estaciones de bombero según sistema de techado

4.2 Clasificación de las estructuras

Para poder iniciar el análisis es necesarios clasificar la estructura según sus características estructurales observadas en campo. Para ello hacemos uso de los cuadros de clasificación brindados por el manual técnico del *HAZUS*. La tabla 3.1 de dicho manual nos brinda la clasificación según su material, sistema estructural y altura de la edificación. En la tabla 5 se muestra la tabla mencionada.

Tabla 5 Tabla de clasificación de la estructura según material, sistema estructural y altura (FEMA, 2011)

No.	Label	Description	Height			
			Range		Typical	
			Name	Stories	Stories	Feet
1	W1	Wood, Light Frame ($\leq 5,000$ sq. ft.)		1 - 2	1	14
2	W2	Wood, Commercial and Industrial ($> 5,000$ sq. ft.)		All	2	24
3	S1L	Steel Moment Frame	Low-Rise	1 - 3	2	24
4	S1M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
5	S1H		High-Rise	8+	13	156
6	S2L	Steel Braced Frame	Low-Rise	1 - 3	2	24
7	S2M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
8	S2H		High-Rise	8+	13	156
9	S3	Steel Light Frame		All	1	15
10	S4L	Steel Frame with Cast-in-Place Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	24
11	S4M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
12	S4H		High-Rise	8+	13	156
13	S5L	Steel Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1 - 3	2	24
14	S5M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
15	S5H		High-Rise	8+	13	156
16	C1L	Concrete Moment Frame	Low-Rise	1 - 3	2	20
17	C1M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
18	C1H		High-Rise	8+	12	120
19	C2L	Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	20
20	C2M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
21	C2H		High-Rise	8+	12	120
22	C3L	Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1 - 3	2	20
23	C3M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
24	C3H		High-Rise	8+	12	120
25	PC1	Precast Concrete Tilt-Up Walls		All	1	15
26	PC2L	Precast Concrete Frames with Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	20
27	PC2M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
28	PC2H		High-Rise	8+	12	120
29	RM1L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Wood or Metal Deck Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
30	RM1M		Mid-Rise	4+	5	50
31	RM2L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Precast Concrete Diaphragms	Low-Rise	1 - 3	2	20
32	RM2M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
33	RM2H		High-Rise	8+	12	120
34	URML	Unreinforced Masonry Bearing Walls	Low-Rise	1 - 2	1	15
35	URMM		Mid-Rise	3+	3	35
36	MH	Mobile Homes		All	1	10

El caso analizado, según la base de datos, tendría una clasificación C3L (Pórtico de concreto de baja altura).

Seguidamente de esto se debe se clasificar la estructura según su uso, para ello se utiliza la tabla 3.2 del manual. En la tabla 6 se muestra la tabla mencionada.

Tabla 6 Clasificación de estructura según tipo de uso (FEMA, 2011)

Label	Occupancy Class	Example Descriptions
	Residential	
RES1	Single Family Dwelling	House
RES2	Mobile Home	Mobile Home
RES3	Multi Family Dwelling RES3A Duplex RES3B 3-4 Units RES3C 5-9 Units RES3D 10-19 Units RES3E 20-49 Units RES3F 50+ Units	Apartment/Condominium
RES4	Temporary Lodging	Hotel/Motel
RES5	Institutional Dormitory	Group Housing (military, college), Jails
RES6	Nursing Home	
	Commercial	
COM1	Retail Trade	Store
COM2	Wholesale Trade	Warehouse
COM3	Personal and Repair Services	Service Station/Shop
COM4	Professional/Technical Services	Offices
COM5	Banks	
COM6	Hospital	
COM7	Medical Office/Clinic	
COM8	Entertainment & Recreation	Restaurants/Bars
COM9	Theaters	Theaters
COM10	Parking	Garages
	Industrial	
IND1	Heavy	Factory
IND2	Light	Factory
IND3	Food/Drugs/Chemicals	Factory
IND4	Metals/Minerals Processing	Factory
IND5	High Technology	Factory
IND6	Construction	Office
	Agriculture	
AGR1	Agriculture	
	Religion/Non/Profit	
REL1	Church/Non-Profit	
	Government	
GOV1	General Services	Office
GOV2	Emergency Response	Police/Fire Station/EOC
	Education	
EDU1	Grade Schools	
EDU2	Colleges/Universities	Does not include group housing

Ya que la estructura analizada cumple el mismo uso en todos los casos, para todas las estaciones la clasificación según su uso será GOV2.

Finalmente se debe clasificar a la estructura según su antigüedad. Para ello es necesario saber la zona sísmica en la cual está ubicada. Para el caso analizado, según el mapa de zonificación sísmica de la NTP E.030, todas las estaciones se encuentran en la zona 4, sin embargo, la clasificación que el manual propone se basa en la zonificación sísmica UBC de los Estados Unidos. Para hacer la compatibilización, es necesarios comparar ambos mapas y verificar cuál es la aceleración máxima horizontal del suelo que cada mapa determina. Los mapas analizados se muestran en las figuras 17 y 18.

Figura 17 Mapa de zonificación sísmica UBC para Estados Unidos (UBC, 1997)

Figura 18 Mapa de zonificación sísmica para Perú (NTP E.030, 2016)

Analizando los mapas se determina que la zona 4 de Perú es muy cercana a la zona 4 de los Estados Unidos, por lo que se utilizara dicha zona para la clasificación de la estructura. Para la clasificación del código de la estructura se utiliza la tabla 6.10 del manual, en la tabla 7 se muestra dicha tabla.

Tabla 7 Clasificación según zona y edad de estructura (FEMA, 2011)

UBC Seismic Zone (NEHRP Map Area)	Post-1973	1941 - 1973	Pre-1941
Zone 4 (Map Area 7)	Special High-Code	Moderate-Code	Pre-Code (W1 = Moderate-Code)
Zone 3 (Map Area 6)	Special Moderate-Code	Moderate-Code	Pre-Code (W1 = Moderate-Code)
Zone 2B (Map Area 5)	Moderate-Code	Low-Code	Pre-Code (W1 = Low-Code)
Zone 2A (Map Area 4)	Low-Code	Low-Code	Pre-Code (W1 = Low-Code)
Zone 1 Map Area 2/3)	Low-Code	Pre-Code (W1 = Low-Code)	Pre-Code (W1 = Low-Code)
Zone 0 (Map Area 1)	Pre-Code (W1 = Low-Code)	Pre-Code (W1 = Low-Code)	Pre-Code (W1 = Low-Code)

Para el caso analizado el código a utilizar es “*Pre-Code*”.

A modo de resumen se muestra la tabla 8, donde se muestra la clasificación final de la estructura.

Tabla 8 Clasificación de estructura modelo (Elaboración propia)

Estructura	Uso	Código
C3L	GOV2	PRE

4.3 Estimación de fragilidad estructural

En la siguiente sección se mostrarán los resultados obtenidos respecto a la fragilidad estructural y el procedimiento que se siguió para poder llegar a ellos, tomando como muestra la estación previamente señalada.

4.3.1 Desarrollo de curva de capacidad

Para poder determinar la fragilidad de la estructura, es necesario elaborar la curva de capacidad de la estructura estudiada. Para ello el método propone la elaboración de una curva

bilineal la cual se determina en base a parámetros establecidos según el tipo de estructura, los parámetros a utilizar son los siguientes:

- Cs: Coeficiente de resistencia de diseño (Fracción del peso del edificio).
- Te: Periodo fundamental de vibración “elástica” (Segundos)
- α_1 : Fracción del peso efectivo del edificio del modelo “*Push-Over*”
- α_2 : Fracción de la altura del edificio en la ubicación del desplazamiento del modelo “*Push-over*”
- γ : Factor de “sobre-resistencia” que relaciona el límite de elasticidad con la resistencia de diseño.
- λ : Factor de “sobre-resistencia” que relaciona la resistencia máxima para ceder la fuerza.
- μ : Factor de “ductilidad” que relaciona el desplazamiento final a λ veces el desplazamiento de resistencia.

Cada uno de los parámetros mencionados está preestablecido en el manual técnico del *HAZUS* para cada configuración estructural, material y código. Los valores se obtienen de las tablas 5.4, 5.5 y 5.6 del manual técnico. Por la extensión de las tablas y la limitación de hojas, dichas tablas serán mostradas en el ANEXO V.

Para obtener la curva de capacidad de la estructura se hará uso de las ecuaciones 2.8 y 2.9. Para el caso trabajado los valores de los parámetros y los valores para armar la curva de capacidad se muestran en la tabla 9 y la gráfica de la curva de capacidad correspondiente se muestra en la figura 19.

Tabla 9 Parámetros y valores para armar la curva de capacidad de la estructura modelo (Elaboración propia)

Factores		Eje X		
Cs	0.050	Inicio	0.000	cm
γ	1.50	Dy	0.305	cm
α_1	0.75	Du	3.430	cm
α_2	0.75	Eje Y		
Te (s)	0.35	Inicio	0.000	g
λ	2.3	Ay	0.100	g
μ	5.0	Au	0.225	g

Figura 19 Curva de capacidad bilineal para la estructura modelo (Elaboración propia)

Como se indicó previamente, la curva de fragilidad obtenida se basa en parámetros correspondientes a estructuras de Estados Unidos y no de Perú. Sin embargo, estos valores brindan un resultado general y una aproximación del posible comportamiento de una estructura en particular.

4.3.2 Seccionamiento de curva de capacidad en estados de daño

Para poder definir los rangos en los que se delimitan los estados de daños se ha hecho uso de las fórmulas mostradas en la tabla 10.

Tabla 10 Formulas para seccionamiento de curva de capacidad (SEAOC, 1995)

Grado de daño	Definicion	Limite de desplazamiento espectral
0	Sin daño	0
1	Operacional	$D < 0.7 D_y$
2	Ocupacion inmediata	$0.7 D_y < D < 1.0 D_y$
3	Seguridad de vida	$1.0 D_y < D < D_y + D_{uy}$
4	Prevencion del colapso	$D_y + D_{uy} < D < D_u$
		$D_{uy} = 0.25(D_u - D_y)$

En donde D_y es el desplazamiento en fluencia y D_u es el desplazamiento último. Ambos puntos son los hallados en la curva de capacidad bilineal. Es decir, que, para el nivel Operacional, el máximo valor es de 0.213 cm; para el de Ocupación inmediata es de 0.305 cm; para el de Seguridad de Vida es de 1.086 cm y para el Prevención del Colapso es de 3.43 cm. En la figura 20 se muestran dichos puntos ubicados en la curva de capacidad.

Figura 20 Seccionamiento de curva de capacidad (Elaboración propia)

Al estar aplicando una metodología Estadounidense, los parámetros para la definición de los estados de daño también corresponden a dicho país. Estas fórmulas brindan intervalos del desempeño que una estructura debería tener frente a un determinado nivel sísmico de manera general para cualquier curva de capacidad. Por lo que, estas fórmulas podrían aplicar a Perú para obtener el nivel de desempeño de las estructuras.

4.3.3 Análisis de coberturas metálicas

Luego de la visita de las estaciones, se observó que una gran cantidad presenta coberturas metálicas, sobre todo el patio de máquinas. Esto representa una limitante para la metodología propuesta, pues esta solo analiza estructuras del mismo material constructivo, motivo por el cual se debe analizar los puntos más críticos de falla de las estructuras, es por ello que un punto clave de análisis son las soldaduras de los perfiles metálicos con los tijerales debido a su tiempo de vida útil y proceso de soldadura.

Para realizar el análisis se debe tener en cuenta que todas las estaciones presentan un tipo de soldadura en filete a distintos espesores y diferentes longitudes a la cual va a ser soldada con la columna de encuentro. Después de lo anterior tomamos como referencia la tabla J2.5 del manual de acero AISC (AISC, 2010) para ver la resistencia a la cortante de diseño de las soldaduras de tipo filete, teniendo en cuenta que el esfuerzo cortante último F_w en una soldadura de penetración completa es de 0.6 veces la resistencia por tensión del metal de aportación a la soldadura denotado por F_{exx} , con ello el esfuerzo de diseño es ϕF_w donde $\phi=0.80$ y $F_w = 0.6 F_{exx}$; teniendo en cuenta lo antes mencionado, para los electrodos más usuales los esfuerzos cortantes de diseño son los siguientes:

$$E60XX: \phi F_w = 0.80 [0.60 (4220)] = 2025.60 \text{ kg/cm}^2$$

$$E70XX: \phi F_w = 0.80 [0.60 (4925)] = 2364.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$E80XX: \phi F_w = 0.80 [0.60 (5630)] = 2702.40 \text{ kg/cm}^2$$

$$E90XX: \phi F_w = 0.80 [0.60 (6330)] = 3038.40 \text{ kg/cm}^2$$

Después de ello se calcula la resistencia por longitud unitaria a diferentes tamaños de soldadura de filete para los electrodos más comunes, los valores obtenidos se muestran en la tabla 11.

Tabla 11 Resistencia última de soldadura en filete (AISC, 2010)

RESISTENCIA ÚLTIMAS EN SOLDADURAS DE FILETE				
TAMAÑO		RESISTENCIA ϕF_w (kg/cm)		
(plg)	(mm)	E60XX	E70XX	E90XX
1/8	3	403	470	603
3/16	5	672	783	1006
1/4	6	806	940	1207
5/16	8	1075	1253	1609
3/8	9	1209	1409	1810
1/2	13	1746	2036	2615
5/8	16	2149	2506	3218

El modelos analizado, la estación “Independencia N°168”, se observó que las soldaduras del tijeral con la plancha metálica adherida son de tipo filete con un espesor aproximado de 3 mm, con un electrodo de aporte tipo *E70XX* obteniendo una resistencia ultima al corte de 2,632.00 kgf, por otro lado se analizó independiente cada columna al encontrarse con un diafragma flexible (techo de calamina galvanizada), obteniéndose una pseudo-aceleración de 0.19 g, el cual me permitirá ajustar la curva de capacidad correspondientes a estructuras mixtas de concreto y acero . En la tabla 12 se muestra el resumen del cálculo de la resistencia de la cobertura metálica. El análisis del resto de coberturas metálicas en otras estaciones se muestra en el ANEXO VII.

Tabla 12: Resumen del cálculo de la resistencia de la cobertura metálica (Elaboración propia)

LIMA NORTE	
Compañía de bomberos B-160 Independencia	Descripción
Ubicación:
	Patio de máquinas
	Techo:
	Cobertura metálica
	Tijeral:
	Dimensiones: 1 1/2"x1 1/2"x3/32"
	Columna:
	Perfil HSS 4"x4"x1/8"
	Soldadura:
	Soldadura de arco tipo filete
	Long. Soldadura(cm):
	4.00
	Tipo de electrodo:
	E70XX
	Espesor de la soldad(mm):
	3.00
	Resistencia última al corte(Kgf) :
	2632.00
	Cortante por sismo(kgf):
	411.48
	Equivalencia de Resistencia última en unidades (g) :
	0.19

Con la metodología propuesta se elabora la curva de capacidad para un pórtico metálico y con el valor obtenido del análisis de la cobertura se delimita hasta 0.19 g. En la figura 21 se muestra la curva de capacidad ajustada para la cobertura. Con la nueva curva se procede a realizar el análisis de fragilidad estructural y vulnerabilidad.

Figura 21 Curva de capacidad ajustada de la cobertura metálica

4.3.4 Desarrollo de curvas de fragilidad estructural

Una vez desarrollada la curva de capacidad de la estructura, se deben definir los estados de daño para poder elaborar la curva de fragilidad. Se definen cuatro estados de daño: leve, moderado, severo y colapso. Para ello el manual propone tablas para simplificar el cálculo de los estados de daño, de dichas tablas se obtiene el valor medio del desplazamiento espectral donde la estructura alcanza el límite del estado de daño ($S_{d,ds}$) y la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral del estado de daño (β_{ds}). Dichos valores se utilizan en la ecuación 4.1 y con dicha ecuación se logra desarrollar la curva de fragilidad de la estructura.

$$P[ds | S_d] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln\left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}}\right)\right] \quad \text{ec. (4.1)}$$

Considerar que la ecuación 4.1 proviene de un análisis con curvas IDA y no de la metodología aplicada en la presente investigación. Sin embargo, dicha formula nos ayuda a obtener un resultado general de las curvas de fragilidad.

Las tablas para obtener los valores de la ecuación 4.1 se muestran en el ANEXO VI. Para el caso analizado, los valores para completar la ecuación se muestran en la tabla 13 y la curva de fragilidad correspondiente se muestra en la figura 22. En el ANEXO VIII. se muestra el desarrollo de las curvas de fragilidad para el resto de las estaciones.

Tabla 13 Valores para la ecuación de curva de fragilidad (Elaboración propia)

	Median (cm)	Beta	
Sd1	0.21	1.19	Leve
Sd2	0.30	1.15	Moderado
Sd3	1.09	1.15	Severo
Sd4	3.43	0.92	Colapso

Figura 22 Curva de fragilidad para la estructura modelo (Elaboración propia)

Considerar que las curvas de fragilidad obtenidas en la investigación son resultados generales debido a simplificación y aproximación de campo.

4.4 Estimación de exposición y vulnerabilidad

En la siguiente sección se describirán el procedimiento para obtener la curva de vulnerabilidad y se mostrarán los resultados obtenidos para la estructura modelos trabajadas en las secciones anteriores.

4.4.1 Estimación de exposición

La curva de vulnerabilidad se puede desarrollar en términos de porcentaje como pérdidas probables o en valores más específicos como el valor monetario de la estructura. En nuestro caso se presentarán ambos modelos. Para ello es necesario estimar el costo aproximado de las edificaciones analizadas. La exposición sísmica es un término que se puede traducir como el valor monetario que tiene la estructura y que se puede perder a causa de un evento sísmico.

Para poder calcular el costo total de la estructura, primero se deberá definir el costo por metro cuadrado según el material predominante de cada estructura. Para las estructuras de

concreto se ha utilizaron los costos de metro cuadrado de construcción que brinda el “Instituto de Desarrollo e Investigación Construir”, en la muestra el costo diferenciando cada ambiente y nivel de acabado. Si bien es cierto se indica que son para viviendas, dichos precios si aplicarían pues una estación de bomberos básica cuenta con los mismo ambientes que una vivienda (sala, comedor, dormitorios, baños, etc). La tabla utilizada se muestra en el ANEXO X. Asimismo, dichos precios se han verificado con los precios que brindan las revistas “Costos” y “Constructivo” para validar que sean precios recientes. Por otro lado, para el resto de materiales se han realizado las consultas con proveedores, instaladores y expertos para poder establecer un costo promedio. El resumen de los costos obtenidos por cada tipo de material se muestra en la tabla 14.

Tabla 14 Costo por m² (Elaboración propia)

Costo (S/.) por m2 construido		
Material noble (Concreto)	Clase A	S/. 1,395.65
	Clase B	S/. 1,078.17
	Clase C	S/. 863.12
Cobertura metálica		S/. 33.00
Estructura metálica (Columnas, tijerales, etc.)		S/. 217.00
Muros de drywall		S/. 85.00
Adobe		S/. 166.99

Teniendo el costo aproximado por m2 construido según material, el siguiente paso a realizar es la obtención de las áreas construidas de cada estación según el material de construcción. Para ello, primero se partimos de las visitas que se tuvieron en campo donde, con el recorrido realizado y fotos tomadas, podemos identificar el material de la estructura, cantidad de pisos y ubicación. Asimismo, por cada estación se elaboró un croquis referencial con medidas para tener una primera aproximación de las áreas. Luego de ellos, se procedió a verificar las medidas con ayuda del *Software Google Earth*, el cual nos permite medir las áreas gracias a las imágenes satélites. En la tabla 15 se muestra el proceso para la obtención de área mediante el programa. En la tabla 16 se muestra, en resumen, el cálculo para la obtención del costo de la estructura. Hay que considerar que las áreas son aproximadas, pues el programa no totalmente preciso. Pero es válida para propósitos de esta investigación en donde se busca un resultado aproximado.

Tabla 15 Estimación de áreas mediante Google Earth (Elaboración propia)

Área del terreno (Construido) = 240 m2	Área de estructura de concreto = 124 m2 (Por piso / Piso 1 y 2 son similares)	Área de cobertura metálica = 116 m2

Tabla 16 Costo total de estructura modelo (Elaboración propia)

Estación Independencia N°168	
Área total del terreno (m2)	240.00
Área construida de concreto (m2)	248.00
Clase	C
Costo por m2 (Concreto)	S/. 641.09
Área construida con cobertura (m2)	116.00
Costo por m2 (Cobertura)	S/. 33.00
Costo total de estructura (S/.)	S/. 158,990.42

El cálculo del costo de la estructura del resto de estaciones se muestra en el ANEXO X.

4.4.2 Desarrollo de las curvas de vulnerabilidad

Para el desarrollo de las curvas de vulnerabilidad se aplicará la metodología de discretización las curvas de vulnerabilidad que se explica en el capítulo 2 acápite 5 (Vulnerabilidad Sísmica). Con los valores obtenidos en la curva de fragilidad desarrollada anteriormente se aplicarán las ecuaciones 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 para obtener la curva de vulnerabilidad del modelo trabajado.

$$P[d_s = \text{Colapso}] = P[d_s \geq \text{Colapso}] \quad \text{ec. (4.2)}$$

$$P[d_s = \text{Severo}] = P[d_s \geq \text{Severo}] - P[d_s \geq \text{Colapso}] \quad \text{ec. (4.3)}$$

$$P[d_s = \text{Moderado}] = P[d_s \geq \text{Moderado}] - P[d_s \geq \text{Severo}] \quad \text{ec. (4.4)}$$

$$P[d_s = Leve] = P[d_s \geq Leve] - P[d_s \geq Moderado] \quad ec. (4.5)$$

El resultado de la aplicación de dichas ecuaciones se traduce en la curva de fragilidad. En la figura 23 se muestra la curva de vulnerabilidad para el modelo trabajado. En el ANEXO VIII se muestra el desarrollo de las curvas de vulnerabilidad para el resto de las estaciones.

Figura 23 Curva de vulnerabilidad de la estación modelo (Elaboración propia)

4.5 Estimación de riesgo sísmico

En la siguiente sección se mostrará los resultados y el procedimiento para la obtención de riesgo sísmico de la estación trabajada en capítulos anteriores. El cálculo para el resto de las estaciones se encuentra en el ANEXO VIII.

4.5.1 Estimación de peligro sísmico

Para la estimación de peligro, se hará uso de leyes de atenuación para poder hallar la aceleración máxima que llegara a la estructura. En este caso se hará uso de la ley de atenuación planteada por Young, et al (1997), la fórmula planteada se muestra en la ecuación (4.6).

$$\ln(y) = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H + 0.3846Z_t \quad ec. (4.6)$$

Donde y es la aceleración producida por un sismo en el estrato rocoso, M es la magnitud del sismo, r_{rup} es la distancia de ruptura, H es la profundidad del sismo, Z_t es el valor del tipo de sismo (0 si es interface y 1 si es intraplaca) y C_i son coeficientes obtenidos como resultado

de pruebas de distribución de varios sismos con las mismas características (R. Youngs, S. Chiou, W. Silva, J. Humphrey, 1997).

La aplicación de esta ley de atenuación corresponde a que en el estudio para determinar la ecuación (4.6) se utilizaron 11 registros ocurridos en el Perú y muchos más ocurridos en diferentes partes del mundo en zonas de subducción. Por el historial de sismos ocurridos en el Perú, se tiene que la mayoría sucede en la zona de subducción y por fallas de interface. Asimismo, la ley de atenuación de Young, et al (1997) permite diferenciar entre los tipos de fallas, lo que otras leyes de atenuación no contemplan.

Para establecer el escenario sísmico se recurrió a los estudios realizados por el IGP, en los cuales se plantea cuál sería el próximo escenario sísmico que podría ocurrir en Lima. Los estudios indican que la máxima magnitud probable del siguiente sismo será de 8.5 Mw y que podrá ocurrir sobre una longitud de 300 km en la zona central de la costa del Perú, desde Huacho hasta Pisco (Tavera H. , 2017). Con esta información, se estableció el escenario sísmico con una magnitud de 8.5 Mw, a una distancia aproximada de 65 km de la costa de Lima y a una profundidad de 30 km. En la figura 24 se muestra en un mapa la ubicación del escenario sísmico propuesto. La distancia se ha definido en base al mapa sísmico del Perú, donde se muestran todos los sismos ocurridos desde el año 1960 hasta el 2017. El punto se ha ubicado en la zona más cercana a Lima y donde hay más concentración de sismos, esta se da en una distancia de entre los 58 km a 70 km de la costa. En la figura 25 se muestra el mapa sísmico del Perú.

Figura 24 Ubicación del escenario sísmico (Elaboración propia)

Figura 25 Mapa sísmico del Perú (IGP, 2017)

Aplicando la ecuación (4.6) y usando los valores establecidos se obtiene el espectro de demanda sísmica para roca. El espectro de demanda sísmica ha sido calculado para cada estación, pues la distancia de ruptura es diferente para cada una. En la figura 26 se muestra el espectro de demanda obtenido.

Figura 26 Espectro de demanda sísmica para ($M_w=8.5$, $R_{rup}=76.2$ y $H=30$)

Como se mencionó, el espectro obtenido nos brinda la pseudo-aceleración producida por un sismo en el estrato rocoso. Para poder obtener la pseudo-aceleración que recibirá la estructura se debe multiplicar por un coeficiente del suelo. Para ello, se ubicaron las estaciones de bombero en el mapa de microzonificación sísmica del CISMID. Para zona I se propone un factor de amplificación sísmica por suelo de $S=1.0$, para la zona II de $S=1.2$, para la zona III de $S=1.4$, para la zona IV de $S=1.6$ y para la zona V de $S=1.8$ (INDECI, 2009). En la figura 27 se muestra el espectro de demanda sísmica amplificado para la estación Independencia N°168 y en la figura 28 se muestra la ubicación de las estaciones de bombero en el mapa de microzonificación sísmica de Lima y Callao.

Figura 27 Espectro de demanda amplificado

Figura 28 Mapa de ubicación de estaciones según tipo de suelo (Adaptado de CISMID, 2013)

4.5.2 Evaluación de riesgo

Para poder evaluar el riesgo sísmico de la estructura, se debe obtener el nivel de desempeño de la estructura. Para ello, primero se debe interceptar la curva de capacidad con el espectro de demanda sísmica para poder obtener el desplazamiento que tendrá la estructura con el escenario sísmico planteado. La combinación de las dos curvas nombradas se muestra en la figura 29.

Figura 29 Intersección de curva de capacidad con espectro de demanda sísmica (Elaboración propia)

De la figura 29 se observa que, con el escenario sísmico utilizado, el punto de desempeño de la estructura se da en un pseudo-desplazamiento (S_d) de 2.35 cm. Analizando la gráfica y el punto de desempeño obtenido, se tiene que el estado de daño de la estructura será de “Prevención del Colapso”. Este valor se ubica en la curva de vulnerabilidad para poder estimar el porcentaje de daño de la estructura. En la figura 30 se muestra la intersección entre el valor hallado y la curva de vulnerabilidad de la estructura modelo analizada.

Figura 30 Ubicación del punto de desempeño en curva de vulnerabilidad

De la intersección se obtiene que la estación de bomberos Independencia N°168 tiene un porcentaje de daño de 56.62%. Con los valores obtenidos en la estimación de exposición y sabiendo el porcentaje de daño que tendrá la estructura, se puede obtener el valor de pérdida económica que habrá en la estructura. Así mismo, se debe considerar que puede haber pérdidas de equipos que significaran un mayor costo de reposición. En la tabla 17 se muestra el resumen de los valores obtenidos para la estación y la conversión del porcentaje de daño a pérdidas económicas de la estación frente al escenario propuesto.

Tabla 17 Resumen de estimación de riesgo sísmico

<u>Estimación de Riesgo</u>			
<u>B-168 Independencia</u>			
Punto de desempeño (aprox)		Porcentaje de daño	
2.35	cm	56.62%	
Costo estimado de la estructura		Costo estimado de daño por escenario	
S/.	158,990.42	S/.	90,027.53
Estado de daño			
Prevencion del colapso			

El procedimiento mostrado ha sido efectuado para todas las estaciones de bombero visitadas. El procedimiento completo de cada una de ellas se muestra en el ANEXO VII.

El mismo análisis se ha realizado para las coberturas metálicas, que como se mencionó anteriormente serán analizadas de forma separada. Como se sigue el mismo procedimiento se mostrarán los resultados finales obtenidos para la cobertura en la estación Independencia N°168. El análisis del resto de estructuras se muestra en el ANEXO IX. En la tabla 18 se muestra el resumen de la estimación de riesgo sísmico para la cobertura metálica.

De la combinación de los dos resultados, se obtiene las posibles pérdidas probables que habrá en la estación luego de un evento sísmico raro.

Tabla 18 Resumen de estimación de riesgo de cobertura metálica

<u>Estimación de Riesgo</u>			
<u>B-168 Independencia</u>			
Punto de desempeño (aprox)		Porcentaje de daño	
3.68	cm	68.20%	
Costo estimado de la estructura		Costo estimado de daño por escenario	
S/.	3,828.00	S/.	2,610.69
Estado de daño			
Prevencion del colapso			

Todo el proceso para la estimación de riesgo sísmico que ha descrito líneas arriba se ha hecho para cada una de las 40 estaciones que abarca la presente investigación. De esta forma se ha obtenido el porcentaje de daño, costo estimado de daño y estado de daño para cada estructura y cobertura metálica si aplicase. En la tabla 19 se muestra el consolidado de todos los resultados obtenidos de la estructura y de la cobertura metálica.

Tabla 19 Resumen general de pérdidas probables de todas las estaciones analizadas

Cuadro resumen de estimación de riesgo

#	Estación	Estructura				Cobertura			
		Punto de desempeño	% de Daño	Estado de daño	Costo de daño	Punto de desempeño	% de Daño	Estado de daño	Costo de daño
1	Comandancia Departamental Lima	1.67	32.59%	Resguardo de vida	S/. 35,154.24				
2	B-2 Roma	1.67	32.59%	Resguardo de vida	S/. 58,771.80				
3	B-4 Lima	3.58	20.98%	Resguardo de vida	S/. 339,341.47				
4	B-8 Victoria	2.54	32.11%	Resguardo de vida	S/. 174,824.85				
5	B-14 Internacional	2.61	32.84%	Resguardo de vida	S/. 643,766.24				
6	B-36 Magdalena	3.52	70.18%	Prevención del colapso	S/. 781,365.99				
7	B-83 San Miguel	2.61	46.17%	Prevención del colapso	S/. 21,290.86	3.78	69.05%	Prevención del colapso	S/. 17,953.00
8	B-100 San Isidro	5.62	56.69%	Prevención del colapso	S/. 342,292.30	3.57	70.15%	Prevención del colapso	S/. 5,671.92
9	B-121 San Juan de Lurigancho	2.05	24.07%	Resguardo de vida	S/. 23,508.94	4.00	82.58%	Prevención del colapso	S/. 44,591.15
10	B-127 Salamanca	0.99	5.77%	Ocupación inmediata	S/. 40,442.80	0.89	13.37%	Ocupación inmediata	S/. 573.58
11	B-176 El Agustino	2.78	63.16%	Prevención del colapso	S/. 172,062.95				
12	B-202 Waldo Hernán Olivios V.	1.54	9.01%	Resguardo de vida	S/. 14,278.19	0.64	426.00%	Operacional	S/. 488.72
13	Comandancia Departamental Callao	2.17	12.19%	Resguardo de vida	S/. 181,798.78				
14	B-1 Unión Chalaca	4.38	68.37%	Prevención del colapso	S/. 1,299,123.69				
15	B-5 Italia	2.05	11.60%	Resguardo de vida	S/. 173,021.49	0.86	6.84%	Ocupación inmediata	S/. 600.53
16	B-7 Garibaldi	1.94	11.06%	Resguardo de vida	S/. 98,965.27				
17	B-9 Salvadora Callao	3.11	51.80%	Prevención del colapso	S/. 26,737.33	2.42	28.12%	Resguardo de vida	S/. 11,599.47
18	B-15 Callao	3.71	71.67%	Prevención del colapso	S/. 356,307.29				
19	B-18 Perú	2.71	32.76%	Resguardo de vida	S/. 623,504.53				
20	B-34 La Punta	5.58	56.45%	Prevención del colapso	S/. 1,067,094.62				
21	B-60 Antonio Alarco Espinoza	2.59	32.63%	Resguardo de vida	S/. 154,637.07				
22	B-75 Técnico Lorenzo Giraldo Vega	1.95	11.11%	Resguardo de vida	S/. 38,544.01				
23	B-184 Brigadier CBP Alejandro Reyes León	3.55	57.17%	Prevención del colapso	S/. 47,436.10	5.55	56.28%	Prevención del colapso	S/. 34,895.83
24	B-207 Adolfo Martin King Leoane	3.45	18.39%	Resguardo de vida	S/. 193,322.45				
25	B-232 Pachacútec	3.55	57.17%	Prevención del colapso	S/. 8,990.28				
26	Comandancia Departamental Lima Sur	0.84	3.60%	Operacional	S/. 17,559.04				
27	B-6 Garibaldi	4.25	25.72%	Resguardo de vida	S/. 236,304.51				
28	B-11 Cosmopolita	1.81	3.54%	Operacional	S/. 46,703.65	1.32	23.08%	Resguardo de vida	S/. 4,296.49
29	B-13 Olaya	3.45	69.60%	Prevención del colapso	S/. 179,764.29				
30	B-28 Miraflores	2.56	32.32%	Resguardo de vida	S/. 425,605.37	2.72	31.22%	Resguardo de vida	S/. 14,515.63
31	B-96 La Molina	1.05	5.01%	Ocupación inmediata	S/. 64,889.00				
32	B-105 Villa el Salvador	1.15	5.66%	Ocupación inmediata	S/. 34,892.27				
33	B-106 Villa María del Triunfo	2.34	29.02%	Resguardo de vida	S/. 205,966.71	1.24	23.91%	Resguardo de vida	S/. 39,509.75
34	B-120 San Juan de Miraflores	1.84	10.56%	Resguardo de vida	S/. 57,348.55	1.34	10.88%	Ocupación inmediata	S/. 5,876.63
35	B-134 Santiago Apóstol	1.79	3.47%	Operacional	S/. 23,073.50				
36	Comandancia Departamental Lima Norte	1.24	4.99%	Ocupación inmediata	S/. -				
37	B-65 San Martin de Porres	1.14	6.74%	Resguardo de vida	S/. 45,023.99				
38	B-124 Comas	2.34	29.96%	Resguardo de vida	S/. 151,515.88	1.68	28.91%	Resguardo de vida	S/. 8,234.65
39	B-161 Los Olivos	1.24	4.99%	Ocupación inmediata	S/. 28,059.75	0.98	10.66%	Resguardo de vida	S/. 59,973.53
40	B-168 Independencia	2.35	56.62%	Prevención del colapso	S/. 90,027.53	3.68	68.20%	Prevención del colapso	S/. 2,610.69

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la siguiente sección se mostrará una recopilación en forma de resumen de todos los resultados obtenidos durante la investigación a fin de poder verificar dichos resultados y poder discutir acerca de lo obtenido y confirmar las hipótesis planteadas en la parte inicial.

5.1 Verificación de los resultados

Para poder verificar la conformidad de las hipótesis se mostrarán de manera resumida los principales resultados obtenidos a lo largo de la investigación.

5.1.1 De la información recolectada

En base a toda la información recolectada de las estaciones se bombero, se han elaborado mapa georreferenciados a fin de mostrar de forma gráfica y resumida la información. De igual manera, se han elaborado gráficos con la misma información.

En primer lugar, se mostrarán la información referida a la antigüedad de las edificaciones. En la recolección de datos se observó que la mayoría de las edificaciones fueron construidas en los últimos cuarenta años, sin embargo, la mayoría de las edificaciones fueron construidas sin asesoramiento de ingenieros y con métodos rústicos. En la figura 31 se muestra el gráfico de la clasificación de las estaciones en rangos por año de construcción, se observa que el 78% de las estaciones analizadas fueron construidas recientemente.

Figura 31 Año de construcción de las estaciones

En segundo lugar, se mostrará la información referente al sistema estructural y material predominante de la estructura. Para ello se ha elaborado un mapa para facilitar la visualización de la información. En la figura 32 se muestra el mapa de sistemas estructurales y material predominante. Como se observa en el mapa la mayoría de las estaciones son pórticos de concreto (27 estaciones).

Figura 32 Mapa de sistemas estructurales y material predominante

En tercer lugar, se mostrará los resultados obtenidos para el costo aproximado de las estaciones de bombero. Para ello se han delimitado 4 intervalos con un rango de S/. 497,500. En la figura 33 se muestra el gráfico de los costos de las estructuras de las estaciones. Se aprecia que la mayoría de las estaciones están entre los S/. 10,000 y S/. 1,005,000. La estación de mayor costo es la Internacional N°14 con un costo de S/. 1,960,120 y la de menor costo es la Pachacutec N°232 con un costo de S/. 15,725.

Figura 33 Gráfico de costo de estructuras

5.1.2 Del análisis de riesgo sísmico

Luego de la aplicación de la metodología para obtener el riesgo sísmico de las estaciones de bombero, se pudo obtener el riesgo sísmico para cada una de ellas. Este valor ha sido interpretado como pérdidas económicas de la estructura frente a un escenario sísmico. Para visualizar geográficamente las pérdidas de cada una de las estaciones, se ha elaborado un mapa en el cual se indica las pérdidas económicas de cada una de las estaciones analizadas. A su vez, se ha preparado una tabla para mostrar en números las pérdidas totales. En la figura 34 y 35 se muestra el mapa de riesgo sísmico de las estaciones de bombero de Lima Metropolitana y Callao y el de coberturas metálicas en las estaciones, respectivamente. En la tabla 20 se muestran las pérdidas probables totales de las estaciones de bombero.

Figura 34 Mapa de riesgo sísmico de estaciones de bombero de Lima y Callao

Figura 35 Mapa de riesgo sísmico de coberturas metálicas en estaciones de bombero

Tabla 20 Pérdidas probables totales en las estaciones de bombero ante un evento sísmico raro

Ítem	Operacional	Ocupación inmediata	Resguardo de vida	Prevención del colapso
Nro. de estaciones	3	5	20	12
Nro. de bomberos	90	249	1152	600
Nro. de vehículos	11	17	95	54
S/. Perdido	S/. 87,824.91	S/. 175,334.57	S/. 4,013,333.84	S/. 4,498,215.82
S/. Total perdido	S/. 8,774,709.14			

Las pérdidas frente al evento sísmico planteado superan los 8 millones de soles, sin embargo, este monto se puede reducir si se plantean técnicas de reforzamiento a las estructuras existentes. Para tener un análisis breve de cuanto se podría ahorrar en costos reforzando las estructuras, se planteó reforzar los componentes de concreto con fibra de carbono y reforzamiento con perfiles para los elementos de acero. Teniendo como referencia los ratios promedio de costo por m² de estas técnicas, se tiene que el costo para la fibra de carbono es de S/. 750.00 por m² y para el reforzamiento con perfiles de S/. 217.00 por m². El área por reforzar corresponde a la multiplicación entre el área construida y el porcentaje de daño que se tiene en cada estación. Haciendo el cálculo, se obtiene que el costo para reforzar las estaciones asciende a aproximadamente 6 millones de soles. Con ello podemos asegurar que las estructuras no sufrirán tanto daño las pérdidas serían mínimas a nulas. Haciendo el balance de costos, se obtiene que el reforzamiento es más económico que tener que reparar las estructuras por las pérdidas luego de un sismo en casi un millón y medio de soles.

5.2 Verificación de los resultados

Frente al problema formulado en la parte inicial de la investigación, con los resultados obtenidos se dice que las estaciones de bombero de Lima Metropolitana y Callao presentan un nivel de riesgo sísmico moderado a alto pues el 40% de las estaciones analizadas se encuentran en el estado de daño “Prevención del Colapso”. Así mismo, se aprecia que 12 estaciones tienen un estado de daño de “Resguardo de Vida”, mientras que 10 tendrán un estado de daño de “Ocupación Inmediata. Con estos resultados se valida la segunda hipótesis planteada, en la cual se asumía que una gran cantidad de estaciones tendrán problemas en la atención inmediata de las emergencias o que quedarán inoperativas.

Asimismo, para poder verificar la confiabilidad de la metodología utilizada, se modeló una estructura de la que se tenía la información suficiente para poder obtener los resultados reales y poder verificar el grado de confianza de la metodología. El modelo al no ser un tema

netamente de la presente investigación, el procedimiento que se siguió se muestra en el ANEXO XI.

Adicionalmente, los resultados obtenidos en esta investigación se acomodan perfectamente a otros estudios previamente realizados con características similares, tales como los estudios realizados a colegios y hospitales y los estudios macro realizados a toda la ciudad de Lima y Callao. Por ejemplo, en el proyecto SATREPS para la mitigación de desastre por daños, se evalúa de manera macro algunos distritos de Lima. En este estudio se obtuvo un mapa de riesgo sísmico por manzanas (CISMID, 2014). En comparación con los resultados obtenidos en esta investigación se obtiene los niveles de riesgo se asemejan a lo mostrado en el mapa de riesgo sísmico del proyecto SATREPS. Esta tendencia se repite con el estudio de riesgo sísmico en hospitales y colegios elaborado por Sandra Santa Cruz. En dicho estudio evalúa diferentes estructuras con diferentes configuraciones estructurales y materiales. De este análisis se obtiene, por ejemplo, que las estructuras de pórticos de concreto antiguas sufrirán un daño moderado a severo (Santa Cruz Hidalgo, 2013). Estos resultados se asemejan bastante a los resultados obtenidos en la presente investigación.

De la información recolectada, se obtuvo que la mayoría de las estaciones de bombero estaban compuestas por pórticos de concreto con un promedio de 2 pisos. La mayoría de las estaciones fueron construidas en los últimos 40 años lo que indica que las estructuras pudieron ser construidas con códigos sísmicos modernos. Sin embargo, en las entrevistas realizadas, se informó que varias de las estaciones no han sido construidas con un apoyo técnico o que no sean han construidas desde un principio como estaciones de bombero, si no que han sido viviendas adaptadas para el uso de la compañía. Estos factores han sido considerados para la elaboración del análisis sísmico de las estaciones. Así mismo, se observó que gran parte de las estaciones contaban con una estructura metálica en el área de máquinas. Por ello, el análisis sísmico de las coberturas metálicas se tenga que hacer por separado ya que la metodología usada se basa en que la estructura analizada es del mismo material.

Del análisis de riesgo sísmico de las estructuras de las estaciones de bombero, se obtuvo el porcentaje de daño que sufrirá la estructura frente al evento sísmico planteado. El porcentaje de daño se trasladó a términos económicos para así poder tener un resultado más concreto y

útil. El resultado general de la estimación de riesgo sísmico de las estaciones demuestra que las estaciones de bombero son vulnerables a un evento sísmico importante. Se obtuvo que más de la mitad de las estructuras sufrirá al menos un 20% de daño, porcentaje importante pues hace que la estructura, si bien no colapsa, genere inseguridad y afecte las labores de la compañía de bomberos. Así mismo, se obtuvo que habrá unas pérdidas económicas superiores a 8 millones de soles, monto muy elevado pues, como se sabe, la institución de la compañía de bomberos es una entidad voluntaria por lo que no tendría un presupuesto establecido para la reparación de daños estructural, lo cual complicara la recuperación de la infraestructura lo que dejara expuesta a la ciudad frente a una emergencia.

6 CONCLUSIONES

Después de realizado el análisis de riesgo sísmico de las estaciones de bombero, se concluye que estas tienen un alto nivel de riesgo sísmico pues se obtuvo que 28 de 40 de las estaciones analizadas superan el estado de daño de “Ocupación Inmediata” teniendo un porcentaje de daño entre 35% y 70% lo que indica que las estructuras sufrirán un fuerte daño. Se estiman que el costo de reparación por los daños ocasionados luego de un evento sísmico de magnitud 8.5 M_w superarán los 8 millones de soles y traerán consecuencias a la población debido a la falta de atención inmediata. Cabe indicar que estos resultados son generales y aproximados que dan una primera referencia del comportamiento estructural de las edificaciones. Haciendo uso de otro procedimiento más analítico se podría obtener resultados más exactos.

6.1 Respecto a la recolección de datos

De la información recolectada se obtuvo que 27 estaciones de las 40 son de concreto armado y la configuración estructural más común es la de pórticos, esto representa el 77% por de la muestra analizada. Se observó que varias estaciones presentaban defectos, como columna corta, y pequeños daños como fisura pequeñas y filtraciones en muros. De la elaboración de mapas, se observó que en las zonas donde están más próximas las estaciones de bombero hay mayores índices de habitantes por metro cuadrado, lo que indica que la implementación de las estaciones si están planificadas según el requerimiento de la población.

6.2 Respecto a la estimación de fragilidad estructural

La metodología utilizada brinda una aproximación del posible comportamiento de una estructura frente a un evento sísmico. La metodología planteada presenta algunas limitaciones en su uso. Como se observó en su aplicación, la metodología analiza estructuras homogéneas de solo un material. Se tuvo que realizar un análisis separado en caso la estructura analizada cuente con un sistema mixto, como concreto más elementos de acero. De las curvas de fragilidad elaboradas, se observó que la mayoría de las estaciones tendrían un comportamiento similar por ser del mismo material y sistema estructural. Asimismo, los parámetros que la metodología plantea corresponden a una realidad distante a la del Perú, pero ayudan a establecer un resultado más parametrizado.

6.3 Respecto a la estimación exposición y vulnerabilidad

La estimación de la exposición se realizó de manera aproximada utilizando precios por metro cuadrado construido pues no resultaba práctico realizar un metrado de toda la estructura al

no contar con planos. La metodología usada para estimar la vulnerabilidad permitió definir la curva a partir de lo obtenido de las curvas de fragilidad. Las curvas de vulnerabilidad obtenidas permitieron hallar el porcentaje de daño de cada estructura analizada de manera gráfica y, junto a los valores de exposición, se obtuvieron las posibles pérdidas económicas.

6.4 Respecto a la estimación de riesgo sísmico

Del escenario sísmico propuesto, se obtuvieron los porcentajes de daño que cada una de las estaciones de bombero recibirá. Se estimó que en 12 estaciones tendrán un estado de daño de “Prevención del Colapso” frente a un sismo raro y 20 estarán en “Ocupación inmediata” lo que indica que la gran mayoría de estaciones quedarán casi inoperativas. Se estimó las posibles pérdidas económicas superarían los 8 millones de soles solo en infraestructura. Los valores obtenidos indican que las estaciones de bombero de Lima Metropolitana y Callao presentan un alto riesgo frente a un evento sísmico de magnitud importante. Las coberturas metálicas sufrirán graves daños. Considerando que estas usualmente están construidas en el patio de máquinas, es probable que cedan y caigan, dañando los vehículos, equipos y personas.

7 RECOMENDACIONES

La investigación presenta un resultado general del posible comportamiento sísmico de las estructuras de las estaciones de bombero, sin embargo, los resultados obtenidos no representan en su totalidad el comportamiento real de las estructuras. Frente a ello, los resultados deberán ser tomados como una referencia del posible desempeño sísmico y no como el valor real que se obtendrá después de un sismo. Para obtener un resultado más exacto se recomienda realizar un análisis estructural a detalle de cada estación modelando la estructura en un *software*, para ello se deberá contar con planos estructurales de cada estación o realizar ensayos en cada estación para conocer las características de los elementos estructurales.

Así mismo, se recomienda realizar el reforzamiento estructural de las estructuras que presentan un mayor porcentaje de daño. Para las estructuras de concreto existen varias técnicas para corregir daños y mejorar la resistencia de los elementos estructurales como: la colocación de encamisados en las columnas, colocar vigas de cimentación, reforzamiento de los con mallas electrosoldadas, adición con elementos metálicos, engrosamiento de elementos estructurales, colocación de cables tensados de acero, entre varias otras (SIKA, 2017) (Tuk, 2010). Para las estructuras de acero se pueden utilizar las siguientes técnicas: arriostramiento diagonal de techo, colocando refuerzos transversales o longitudinales, reforzamiento con soldaduras, entre otras (Hierro & et.al, 2014). Finalmente, para las estructuras de adobe se pueden utilizar las siguientes técnicas: colocar mallas electrosoldadas, enmallado de la superficie, entre otras (San Bartolome, Quiun, & Zegarra, 2003). Estas son solo algunas de las metodologías más usadas para el reforzamiento de estructuras y que en base a lo que se ha visto en cada una de las estaciones se podrían aplicar, sin embargo, para tener la certeza de que metodología es la mejor, se recomienda que un especialista en la materia realice la inspección y pueda definirlo.

Por último, como futuras investigaciones, se podría estimar las posibles pérdidas humanas en cada estación de bombero y evaluar, junto con las pérdidas económicas ya obtenidas, las posibles consecuencias que todo ellos generaran en la población ante un evento sísmico. Así mismo, se podría implementar las técnicas de reforzamiento planteadas y analizar como beneficiarán dichas mejoras a la estructura y concluir si dichas técnicas reducirán considerablemente los porcentajes de daño de las estructuras.

8 REFERENCIAS

- Aguiar, R. (2006). *Evaluacion rapida de la deriva maxima de piso para calcular la vulnerabilidad sismica de estructuras*. Barcelona: Monografias CIMNE.
- AISC. (2010). *Specification for Structural Steell Building*. Chicago-Illinois.
- Alva Hurtado, J., & Escalaya, M. (2011). *Actualización de los parametros simologicos en la evaluacion del peligro sísmico en el Perú*. Lima-Perú: Guzlop.
- ATC. (2002). *Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook (FEMA 154 report)*. Washington, D.C: Federal Emergency.
- Barbat, A., Ciacedo, C., & Canas, J. (1994). *Vulnerabilidad sísmica de edificios*. Barcelona, España: A.H.Barbat.
- Bendezu, J. S., & Ly, R. E. (2016). *Evaluacion probabilistica del riesgo sismico de hospitales en Lima con plataforma CAPRA*. Lima, Peru: PUCP.
- Benedetti, D., & Petrini, G. (1984). «Sulla vulnerabilitá sismica di edifici in muratura i proposte di un metodo di valutazione. industria de le Construzioni.
- Bonett, R. (2003). *Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada Tesis Doctoral*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cardona Arboleda, O. D. (2001). *"Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos"*. Barcelona, España: UPC.
- Cardona, et al. (2012). *Risk assessment: Internatonal Iniciative for risk managament effectiveness*. Lisboa: 15 WCEE.
- Charca, O., Gamarra, C., & Parra, D. (2018). *Seleccion de leyes de atenuacion sismica de subduccion para la evaluacion del peligro sismico en el Perú. XX Congreso Nacional de Ingenieria Civil*. Lima - Peru.
- Chong, W., & Soong, T. (2000). *Sliding fragility of unrestrained equipment in critical facilities*. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.

- CISMID. (2014). *Resultado del proyecto Japon-Peru-SATREPS*. Lima, Peru: Universidad Nacional de Ingenieria.
- Cornell , A. (1968). "Engineering Seismic Risk Analysis". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 58, No. 5 pags. 1538-1606.
- Drury, C. (2000). *HAZUS99 Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States*. Washington, DC.
- FEMA 154. (2005). "*Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards*". Washintong, EEUU.
- FEMA. (2011). *HAZUS-MH 2.1. Multi-Hazard loss estimation methodology: earthquake model. Technical Manual*. Washington D.C.: FEMA.
- FEMA 274. (1997). *NEHRP Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington, EE.UU.
- FEMA 356. (15 de January de 2000). *Official website of the Department of Homeland Security*. Obtenido de <https://www.fema.gov/your-earthquake-risk>
- GOAL. (2015). *Herramienta para medir la resiliencia comunitaria ante desastres*. Guatemala.
- Gutiérrez, A. (2015). *Cambios de paradigmas en ingeniería civil. Seminario Técnico SIVENSA- PAG Marketing*. Caracas.
- Hierro, J., & et.al. (2014). Criterios para el refuerzo de estructuras metalicas. *Revista Ingenieria de Construccion*, 133-149.
- INDECI. (2009). *Diseño del escenario sobre el impacto de un sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao, Perú*. Lima-Peru: Centro de Estrudios y Prevencion de Desastres - PREDES.
- K. Sadigh, C. Chang, J. Egan, F. Makdisi, R. Youngs. (1997). Attenuation relationships for Shallow Crustal earthquake based on California strong motion data. *Seismological Research Letters*, 180-189.
- M. Ordaz, E. Miranda, R. Reinoso, L. Perez-Rocha. (2000). *Seismic loss estimation model for Mexico City*. Auckland: 12th World Conference on Earthquake Engineering.

- Miranda, E. (1996). *Assessment of the seismic vulnerability of existing buildings*. Acapulco: 11th World Conference on Earthquake Engineering.
- R. Youngs, S. Chiou, W. Silva, J. Humphrey. (1997). Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, 58-73.
- Reyes, N., Sarria, A., & Maltez, J. (2001). *Metodologia para la determinacion de la vulnerabilidad simica en edificaciones*. Nicaragua: INTER. Obtenido de Geofisica en Nicargua.
- RNE NTP E.030. (2016). *Diseño Sismoresistente*. LIMA, PERU: SENCICO.
- Sadeghi, M., Ghafory-Ashtiany, M., & Pakdel-Lahiji, N. (2015). Developing seismic vulnerability curves for typical Iranian buildings. *Journal of Risk and Reliability*, 1-14.
- San Bartolome, A., Quiun, D., & Zegarra, L. (2003). *Tecnicas para el reforzamiento sismico de viviendas de adobe*. Guanajuato-Leon, Mexico: XIV Congreso Nacional de Ingenieria Sismica.
- Santa Cruz Hidalgo, S. C. (2013). *Evaluacion probabilistica del riesgo sismico de escuelas y hospitales de la ciudad de Lima*. Lima, Peru: PUCP.
- Santa Cruz Hidalgo, S. C. (2014). *Primer taller de Riesgo Sísmico en colégios públicos*. LIMA,PERÚ: PUCP.
- SEAOC. (1995). *Vision 2000: Performance Based Seismic Engeneering of Buildings*. San Francisco: Structural Engineers Association of California.
- SIKA. (2017). *Reforzamiento de estructuras de concreto*. Lima-Peru.
- Silva, V. (2015). *Seismic Vulnerability Assesment*. Pavia, Italia.
- Tavera, H. (2017). *Actualización del escenario por sismo, tsunami y exposicion en la region central del Perú*. Lima-Perú: Ministerio del Ambiente-IGP.
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C., Ordaz, M., Zevallos, A., & Ishizawa, O. (2014). *Evaluación de peligro sísmico en Perú*. Lima-Perú: Instituto Geofísico del Perú.

Tuk, E. R. (2010). *Tecnicas de reforzamiento de estructuras construidas de concreto que presentan deficiencias estructurales*. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

UNDRO. (1979). “*Natural Disasters and Vulnerability Analysis*”.

Universidad de Alicante. (4 de Mayo de 2015). *Peligrosidad Sísmica*. Obtenido de <https://web.ua.es/es/urs/peligrosidad/modelos-probabilisticos.html#Nozonificado>

Yamazaki, F. (2000). *Fragility curves for buildings in Japan based on damage surveys after the 1995 Kobe earthquake*. Auckland, 12th World.

ANEXO I: Listado de definiciones

- **CAPRA-GIS:** Por sus siglas significa enfoque integral para la evaluación probabilística del riesgo-sistema de información geográfica. El *software* ha sido desarrollado por ERN-AL y está orientado al cálculo de riesgos por amenazas naturales en base a las metodologías de CAPRA.
- **Curvas de Fragilidad:** Relaciones gráficas que expresan en forma continua la relación media entre el daño y la intensidad del movimiento sísmico, por tipo de edificación. Estas relaciones pueden ser derivadas a partir de un conjunto de observaciones de daños para diferentes tipologías estructurales o a través de un proceso de simulación numérica.
- **Escenario Sísmico:** Representación de los resultados de la interacción de los diferentes factores de riesgo en un territorio
- **Exposición:** Valor del sistema desde el punto de vista del medio físico y económico, es decir lo que está expuesto al peligro.
- **Fragilidad:** Medición de que tan afectable puede llegar a ser mi sistema a causa de estos peligros.
- **Leyes de Atenuación:** Son expresiones que relacionan magnitud, posición relativa fuente-sitio e intensidad sísmica, éstas son necesarias para evaluar los efectos que produce cada una de las fuentes en el sitio de interés, en términos de intensidad sísmica.
- **Resiliencia:** Factor que se enfoca en la capacidad de las personas para recuperarse y aprender de una experiencia ante un desastre
- **Riesgo Sísmico:** El daño o las pérdidas que probablemente resultarán de la exposición a peligros sísmicos. Por lo general, se miden en términos de pérdidas esperadas (muertes y lesiones), pérdidas económicas directas (costos de reparación y reemplazo) y pérdidas económicas indirectas (ingresos perdidos durante el tiempo de inactividad debido a daños a la propiedad privada o la infraestructura pública).
- **Sistema de Información Geográfica (GIS):** Conjunto organizado de *hardware*, *software* y datos geográficos diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin poder tomar decisiones para resolver algún problema complejo.
- **Vulnerabilidad:** Predisposición intrínseca a sufrir daño ante la ocurrencia de un movimiento sísmico y está asociada directamente con sus características físicas y estructurales de diseño.

ANEXO II: Metodologías existentes

FEMA-154 Data Collection Form										HIGH Seismicity									
										Address: _____ _____ Zip _____ Other Identifiers _____ No. Stories _____ Year Built _____ Screener _____ Date _____ Total Floor Area (sq. ft.) _____ Building Name _____ Use _____									
										<div style="text-align: center; height: 200px;"> PHOTOGRAPH </div>									
Scale: _____																			
OCCUPANCY					SOIL TYPE					FALLING HAZARDS									
Assembly	Govt	Office	Number of Persons		A	B	C	D	E	F	☐	☐	☐	☐					
Commercial	Historic	Residential	0 - 10	11 - 100	Hard	Avg.	Dense	Stiff	Soft	Poor	Unreinforced	Panopets	Cladding	Other					
Emer. Services	Industrial	School	101-1000	1000+	Rock	Rock	Soil	Soil	Soil	Soil	Chimneys								
BASIC SCORE, MODIFIERS, AND FINAL SCORE, S																			
BUILDING TYPE	W1	W2	S1	S2	S3	S4	S5	C1	C2	C3	PC1	PC2	RM1	RM2	URM				
	(RMF)	(RM)	(RM)	(RM)	(RM)	(RC RM)	(URM RM)	(RMF)	(RM)	(URM RM)	(TA)	(RM)	(RM)	(RM)	(RM)				
Basic Score	4.4	3.8	2.8	3.8	3.2	2.8	2.0	2.5	2.8	1.8	2.8	2.4	2.8	2.8	1.8				
Mid Rise (4 to 7 stories)	N/A	N/A	+0.2	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	+0.4	+0.2	N/A	+0.2	+0.4	+0.4	0.0				
High Rise (> 7 stories)	N/A	N/A	+0.6	+0.8	N/A	+0.8	+0.8	+0.8	+0.8	+0.3	N/A	+0.4	N/A	+0.6	N/A				
Vertical Irregularity	-2.5	-2.0	-1.0	-1.5	N/A	-1.0	-1.0	-1.5	-1.8	-1.8	N/A	-1.8	-1.0	-1.0	-1.8				
Plan Irregularity	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5				
Pre-Code	0.8	-1.0	-1.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.2	-1.2	-1.8	-0.2	-0.8	-0.8	-1.0	-0.8	-0.2				
Post-Benchmark	+2.4	+2.4	+1.4	+1.4	N/A	+1.8	N/A	+1.4	+2.4	N/A	+2.4	N/A	+2.8	+2.6	N/A				
Soil Type C	0.0	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4				
Soil Type D	0.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.4	-0.8	-0.8	-0.4	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8				
Soil Type E	0.0	-0.8	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-0.8	-1.2	-0.8	-0.8	-0.4	-1.2	-0.4	-0.8	-0.8				
FINAL SCORE, S																			
COMMENTS														Detailed Evaluation Required YES NO					

* = Estimated, subjective, or unreliable data
 DNK = Do Not Know

BR = Braced frame
 FD = Flexible diaphragm
 LM = Light metal

MPF = Moment-resisting frame
 RC = Reinforced concrete
 RD = Rigid diaphragm

SW = Shear wall
 TU = Tilt up
 URM RM = Unreinforced masonry infill

Fig. 1 (ANEXO II) Formulario de recolección de datos (ATC, 2002)

Fig. 2 (ANEXO II) Metodología para la simulación de las curvas de fragilidad (Adaptado de Bonett 2003)

Tab. 1 (ANEXO II) Matriz de exposición

Nº	Parámetros	Categorías (ω)		
		A	B	C
1	Tipo de servicio (15%)	0	7.5	15
2	Cantidad de persona(35%)	0	17.5	35
3	Accesibilidad a un lugar seguro(20%)	0	10	20
4	Rango de edades(30%)	0	5	30

Tab. 2 (ANEXO II) Nivel de resiliencia, adaptado de (GOAL,2015)

%	NIVEL	CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
0-20	1	Mínima Resiliencia	Poca conciencia del problema o poca motivación para abordarlo. Acciones limitadas a respuestas durante crisis.
21-40	2	Baja Resiliencia	Conciencia del problema y anuencia a abordarlo. Capacidad para actuar (conocimiento y habilidades, recursos humanos, materiales y otros) permanece limitada. Intervenciones tienden a ser únicas, fragmentadas y a corto plazo.
41-60	3	Mediana Resiliencia	Desarrollo e implementación de soluciones. Capacidad de actuar está mejorada y es substancial. Las intervenciones son más numerosas y de largo plazo.
61-80	4	Resiliencia	Coherencia e integración. Intervenciones son amplias, cubriendo los mayores aspectos del problema y están ligadas a una estrategia coherente de largo plazo.
81-100	5	Alta Resiliencia	Existe una "cultura de seguridad" entre los accionistas donde el RRD está incluida en toda política importante, planeación, prácticas, actitudes y comportamientos.

Tab. 3 (ANEXO II) Ítem de vulnerabilidad (Reyes, Sarria, & Maltez, 2001)

PARÉMETROS
1. Organización del sistema resistente
2. Calidad del sistema resistente
3. Resistencia convencional
4. Posición del edificio y cimentación
5. Diafragma horizontales
6. Configuración de la planta
7. Configuración de la elevación
8. Distancia máxima entre muros
9. Tipo de cubierta
10. Elementos no estructurales
11. Estado de conservación

Tab. 4 (ANEXO II) Escala de vulnerabilidad (Benedetti-Petrini, 1984)

PARÉMETROS	Clase Ki				Peso Wi
	A	B	C	D	
1. Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1.50
2. Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	1.00
3. Resistencia convencional	0	5	25	45	1.00
4. Posición del edificio y cimentación	0	5	25	45	1.00
5. Diafragma horizontales	0	5	15	45	0.50
6. Configuración de la planta	0	5	25	45	1.00
7. Configuración de la elevación	0	5	25	45	1.00
8. Distancia máxima entre muros	0	5	25	45	0.75
9. Tipo de cubierta	0	15	25	45	0.25
10. Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11. Estado de conservación	0	5	25	45	0.25

Tab. 5 (ANEXO II) Caracterización del daño para el Índice de daño (modificada) (Park, Ang y Wen, 1993)

Estado de daño	Indice de Park, Ang y Wen	Descripción del estado de daño
Menor	$ID < 0.25$	Agrietamiento ligero generalizado en toda la estructura
Moderado	$0.25 \leq ID < 0.4$	Agrietamiento fuerte y pérdida del recubrimiento localizado en varios elementos estructurales
Severo	$0.4 \leq ID < 0.8$	Aplastamiento del concreto y exposición del refuerzo
Total	$0.8 \leq ID < 1.0$	Colapso parcial o destrucción total del edificio
Colapso	$ID \geq 1.0$	Colapso total del edificio

Tab. 6 (ANEXO II) Funciones de vulnerabilidad para diferentes índices de vulnerabilidad (Reyes, Sarria, & Maltez, 2001)

VI normalizado	Función de la recta
100	Indice de Daño = $8.6154 \cdot (a/g) - 0.1231$
90	Indice de Daño = $7.6712 \cdot (a/g) - 0.1371$
80	Indice de Daño = $8.6154 \cdot (a/g) - 0.1325$
70	Indice de Daño = $8.6154 \cdot (a/g) - 0.1368$
60	Indice de Daño = $8.6154 \cdot (a/g) - 0.1376$
50	Indice de Daño = $8.6154 \cdot (a/g) - 0.1452$
40	Indice de Daño = $8.6154 \cdot (a/g) - 0.1301$
30	Indice de Daño = $8.6154 \cdot (a/g) - 0.1261$
20	Indice de Daño = $8.6154 \cdot (a/g) - 0.1194$
10	Indice de Daño = $8.6154 \cdot (a/g) - 0.1226$
0	Indice de Daño = $8.6154 \cdot (a/g) - 0.1188$

ANEXO III: Carta de presentación y permiso otorgado por el CGBVP

Fig. 2 (ANEXO III) Carta de presentación

**Cuerpo General de Bomberos
Voluntarios del Perú - CGBVP
Hoja de Tramite**

Datos Principales

Nro Registro : 201705153
Fecha/H de Registro : 15-SET-2017 03:42:00
Área Origen : Trámite Documentario
Fecha/H Derivo : 15-SET-2017 15:42:00
Nro de Referencia : SIN NUMERO
Institución : UPC
Remitente : ROMAN ARCINIEGA A.
Tipo Documento : CARTA

Asunto

SOLICITUD DE APOYO PARA ALUMNOS DEL 9NO CICLO

	Origen	Destino	Ind	Fecha Derivo	Fecha Aceptado	Número de Documento	Fls	Observaciones
1	FTD	DIGO	03					Se autoriza y se comunica a los beneficiarios a los que se les otorga el apoyo.
2								
3								IV-V-XXV
4								
5								
6								
7								
8								

Observaciones:

GLANCARLOS DELGADO PULCINELLI CON COD. U201312169 SANTOS KEVIN RUBINOS BARTENS CON COD.U201314419

Referencias:

Indicaciones:

01. ACCION NECESARIA
02. POR CORRESPONDERLE
03. ARCHIVAR
04. ESTUDIO E INFORME
05. TRANSCRIBIR
06. CONOCIMIENTO Y RESPUESTA
07. CONOCIMIENTO Y RESPUESTA
08. PARA COMENTARIOS
09. CONOCIMIENTO Y RESPUESTA
10. PARA COMENTARIOS
11. PARA COMENTARIOS
12. PARA COMENTARIOS

Fig. 3 (ANEXO III) Permiso otorgado por el CGBVP

ANEXO IV: Ficha descriptiva y panel fotográfico de las estaciones de bombero y sedes administrativas

Este ANEXO será presentado de forma digital debido a la extensión de este. Los archivos se adjuntarán en una carpeta comprimida y serán presentados en Excel. Dentro del archivo se encontrarán:

- Ficha descriptiva de la estación,
- Panel fotográfico con su descripción y,
- La base de datos completo de las estaciones visitadas.

ANEXO V: Cuadros de los valores de los parámetros para obtener la curva de capacidad bilineal.

Tab. 7 (ANEXO V) Tabla de parámetros – Resistencia de diseño (C_s) (FEMA, 2011)

Building Type	Seismic Design Level (Fraction of Building Weight)			
	High-Code	Moderate-Code	Low-Code	Pre-Code
W1	0.200	0.150	0.100	0.100
W2	0.200	0.100	0.050	0.050
S1L	0.133	0.067	0.033	0.033
S1M	0.100	0.050	0.025	0.025
S1H	0.067	0.033	0.017	0.017
S2L	0.200	0.100	0.050	0.050
S2M	0.200	0.100	0.050	0.050
S2H	0.150	0.075	0.038	0.038
S3	0.200	0.100	0.050	0.050
S4L	0.160	0.080	0.040	0.040
S4M	0.160	0.080	0.040	0.040
S4H	0.120	0.060	0.030	0.030
S5L			0.050	0.050
S5M			0.050	0.050
S5H			0.038	0.038
C1L	0.133	0.067	0.033	0.033
C1M	0.133	0.067	0.033	0.033
C1H	0.067	0.033	0.017	0.017
C2L	0.200	0.100	0.050	0.050
C2M	0.200	0.100	0.050	0.050
C2H	0.150	0.075	0.038	0.038
C3L			0.050	0.050
C3M			0.050	0.050
C3H			0.038	0.038
PC1	0.200	0.100	0.050	0.050
PC2L	0.200	0.100	0.050	0.050
PC2M	0.200	0.100	0.050	0.050
PC2H	0.150	0.075	0.038	0.038
RM1L	0.267	0.133	0.067	0.067
RM1M	0.267	0.133	0.067	0.067
RM2L	0.267	0.133	0.067	0.067
RM2M	0.267	0.133	0.067	0.067
RM2H	0.200	0.100	0.050	0.050
URML			0.067	0.067
URMM			0.067	0.067
MH	0.100	0.100	0.100	0.100

Tab. 8 (ANEXO V) Tabla de parámetros – Factores de respuesta (α_1 , α_2) y factores de sobreesfuerzo (γ , λ) (FEMA, 2011)

Building Type	Height to Roof (Feet)	Period, T_e (Seconds)	Modal Factors		Overstrength Ratios	
			Weight, α_1	Height, α_2	Yield, γ	Ultimate, λ
W1	14.0	0.35	0.75	0.75	1.50	3.00
W2	24.0	0.40	0.75	0.75	1.50	2.50
S1L	24.0	0.50	0.80	0.75	1.50	3.00
S1M	60.0	1.08	0.80	0.75	1.25	3.00
S1H	156.0	2.21	0.75	0.60	1.10	3.00
S2L	24.0	0.40	0.75	0.75	1.50	2.00
S2M	60.0	0.86	0.75	0.75	1.25	2.00
S2H	156.0	1.77	0.65	0.60	1.10	2.00
S3	15.0	0.40	0.75	0.75	1.50	2.00
S4L	24.0	0.35	0.75	0.75	1.50	2.25
S4M	60.0	0.65	0.75	0.75	1.25	2.25
S4H	156.0	1.32	0.65	0.60	1.10	2.25
S5L	24.0	0.35	0.75	0.75	1.50	2.00
S5M	60.0	0.65	0.75	0.75	1.25	2.00
S5H	156.0	1.32	0.65	0.60	1.10	2.00
C1L	20.0	0.40	0.80	0.75	1.50	3.00
C1M	50.0	0.75	0.80	0.75	1.25	3.00
C1H	120.0	1.45	0.75	0.60	1.10	3.00
C2L	20.0	0.35	0.75	0.75	1.50	2.50
C2M	50.0	0.56	0.75	0.75	1.25	2.50
C2H	120.0	1.09	0.65	0.60	1.10	2.50
C3L	20.0	0.35	0.75	0.75	1.50	2.25
C3M	50.0	0.56	0.75	0.75	1.25	2.25
C3H	120.0	1.09	0.65	0.60	1.10	2.25
PC1	15.0	0.35	0.50	0.75	1.50	2.00
PC2L	20.0	0.35	0.75	0.75	1.50	2.00
PC2M	50.0	0.56	0.75	0.75	1.25	2.00
PC2H	120.0	1.09	0.65	0.60	1.10	2.00
RM1L	20.0	0.35	0.75	0.75	1.50	2.00
RM1M	50.0	0.56	0.75	0.75	1.25	2.00
RM2L	20.0	0.35	0.75	0.75	1.50	2.00
RM2M	50.0	0.56	0.75	0.75	1.25	2.00
RM2H	120.0	1.09	0.65	0.60	1.10	2.00
URML	15.0	0.35	0.50	0.75	1.50	2.00
URMM	35.0	0.50	0.75	0.75	1.25	2.00
MH	10.0	0.35	1.00	1.00	1.50	2.00

Tab. 9 (ANEXO V) Tabla de parámetros – Ductilidad (μ) (FEMA, 2011)

Building Type	Seismic Design Level			
	High-Code	Moderate-Code	Low-Code	Pre-Code
W1	8.0	6.0	6.0	6.0
W2	8.0	6.0	6.0	6.0
S1L	8.0	6.0	5.0	5.0
S1M	5.3	4.0	3.3	3.3
S1H	4.0	3.0	2.5	2.5
S2L	8.0	6.0	5.0	5.0
S2M	5.3	4.0	3.3	3.3
S2H	4.0	3.0	2.5	2.5
S3	8.0	6.0	5.0	5.0
S4L	8.0	6.0	5.0	5.0
S4M	5.3	4.0	3.3	3.3
S4H	4.0	3.0	2.5	2.5
S5L			5.0	5.0
S5M			3.3	3.3
S5H			2.5	2.5
C1L	8.0	6.0	5.0	5.0
C1M	5.3	4.0	3.3	3.3
C1H	4.0	3.0	2.5	2.5
C2L	8.0	6.0	5.0	5.0
C2M	5.3	4.0	3.3	3.3
C2H	4.0	3.0	2.5	2.5
C3L			5.0	5.0
C3M			3.3	3.3
C3H			2.5	2.5
PC1	8.0	6.0	5.0	5.0
PC2L	8.0	6.0	5.0	5.0
PC2M	5.3	4.0	3.3	3.3
PC2H	4.0	3.0	2.5	2.5
RM1L	8.0	6.0	5.0	5.0
RM1M	5.3	4.0	3.3	3.3
RM2L	8.0	6.0	5.0	5.0
RM2M	5.3	4.0	3.3	3.3
RM2H	4.0	3.0	2.5	2.5
URML			5.0	5.0
URMM			3.3	3.3
MH	6.0	6.0	6.0	6.0

ANEXO VI: Cuadros de los valores para la función de fragilidad

Tab. 10 (ANEXO VI) Tabla de valores para curva de fragilidad – Código de diseño sísmico alto (High-Code) (FEMA, 2011)

Building Properties			Interstory Drift at				Spectral Displacement (inches)							
Type	Height (inches)		Threshold of Damage State				Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Roof	Modal	Slight	Moderate	Extensive	Complete	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	12.6	0.0050	0.0150	0.0500	0.1250	0.63	0.66	1.89	0.72	6.30	0.72	15.75	0.91
W2	288	21.6	0.0050	0.0150	0.0500	0.1250	1.08	0.69	3.24	0.77	10.80	0.89	27.00	0.85
S1L	288	21.6	0.0075	0.0150	0.0375	0.1000	1.62	0.67	3.24	0.70	8.10	0.71	21.60	0.68
S1M	720	54.0	0.0050	0.0100	0.0250	0.0667	2.70	0.62	5.40	0.62	13.50	0.63	36.00	0.71
S1H	1872	112.3	0.0037	0.0075	0.0188	0.0500	4.21	0.63	8.42	0.62	21.06	0.62	56.16	0.63
S2L	288	21.6	0.0063	0.0125	0.0375	0.1000	1.35	0.69	2.70	0.80	8.10	0.89	21.60	0.84
S2M	720	54.0	0.0042	0.0083	0.0250	0.0667	2.25	0.62	4.50	0.66	13.50	0.66	36.00	0.71
S2H	1872	112.3	0.0031	0.0063	0.0188	0.0500	3.51	0.62	7.02	0.63	21.06	0.63	56.16	0.66
S3	180	13.5	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.68	0.66	1.35	0.71	4.05	0.80	11.81	0.90
S4L	288	21.6	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	1.08	0.77	2.16	0.82	6.48	0.92	18.90	0.91
S4M	720	54.0	0.0033	0.0067	0.0200	0.0583	1.80	0.69	3.60	0.67	10.80	0.68	31.50	0.82
S4H	1872	112.3	0.0025	0.0050	0.0150	0.0438	2.81	0.62	5.62	0.63	16.85	0.65	49.14	0.73
S5L														
S5M														
S5H														
C1L	240	18.0	0.0063	0.0125	0.0375	0.1000	1.13	0.69	2.25	0.74	6.75	0.82	18.00	0.81
C1M	600	45.0	0.0042	0.0083	0.0250	0.0667	1.87	0.63	3.75	0.65	11.25	0.66	30.00	0.71
C1H	1440	86.4	0.0031	0.0063	0.0188	0.0500	2.70	0.63	5.40	0.63	16.20	0.63	43.20	0.69
C2L	240	18.0	0.0050	0.0125	0.0375	0.1000	0.90	0.69	2.25	0.72	6.75	0.82	18.00	0.95
C2M	600	45.0	0.0033	0.0083	0.0250	0.0667	1.50	0.65	3.75	0.69	11.25	0.66	30.00	0.70
C2H	1440	86.4	0.0025	0.0063	0.0188	0.0500	2.16	0.62	5.40	0.63	16.20	0.64	43.20	0.69
C3L														
C3M														
C3H														
PC1	180	13.5	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.68	0.63	1.35	0.74	4.05	0.79	11.81	0.96
PC2L	240	18.0	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.90	0.76	1.80	0.80	5.40	0.87	15.75	0.97
PC2M	600	45.0	0.0033	0.0067	0.0200	0.0583	1.50	0.66	3.00	0.73	9.00	0.72	26.25	0.73
PC2H	1440	86.4	0.0025	0.0050	0.0150	0.0438	2.16	0.62	4.32	0.64	12.96	0.65	37.80	0.74
RM1L	240	18.0	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.90	0.70	1.80	0.74	5.40	0.76	15.75	0.98
RM1M	600	45.0	0.0033	0.0067	0.0200	0.0583	1.50	0.63	3.00	0.68	9.00	0.70	26.25	0.70
RM2L	240	18.0	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.90	0.66	1.80	0.70	5.40	0.76	15.75	0.97
RM2M	600	45.0	0.0033	0.0067	0.0200	0.0583	1.50	0.63	3.00	0.70	9.00	0.69	26.25	0.68
RM2H	1440	86.4	0.0025	0.0050	0.0150	0.0438	2.16	0.63	4.32	0.63	12.96	0.63	37.80	0.65
URML														
URMM														
MH	120	12.0	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.60	0.81	1.20	0.89	3.60	0.97	10.50	0.86

Tab. 11 (ANEXO VII) Tabla de valores para curva de fragilidad – Código de diseño sísmico moderado (Moderate-Code) (FEMA, 2011)

Building Properties			Interstory Drift at Threshold of Damage State				Spectral Displacement (inches)							
Type	Height (inches)						Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Roof	Modal	Slight	Moderate	Extensive	Complete	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.0050	0.0124	0.0383	0.0937	0.63	0.76	1.56	0.77	4.82	0.78	11.81	0.96
W2	288	216	0.0050	0.0124	0.0383	0.0938	1.08	0.79	2.68	0.86	8.27	0.88	20.25	0.84
S1L	288	216	0.0075	0.0130	0.0294	0.0750	1.62	0.73	2.80	0.71	6.35	0.70	16.20	0.77
S1M	720	540	0.0050	0.0086	0.0196	0.0500	2.70	0.64	4.67	0.65	10.58	0.66	27.00	0.75
S1H	1872	1123	0.0037	0.0065	0.0147	0.0375	4.21	0.62	7.29	0.62	16.51	0.66	42.12	0.70
S2L	288	216	0.0063	0.0108	0.0292	0.0750	1.35	0.82	2.34	0.85	6.30	0.89	16.20	0.85
S2M	720	540	0.0042	0.0072	0.0194	0.0500	2.25	0.66	3.90	0.66	10.50	0.68	27.00	0.81
S2H	1872	1123	0.0031	0.0054	0.0146	0.0375	3.51	0.62	6.08	0.63	16.38	0.65	42.12	0.71
S3	180	135	0.0050	0.0087	0.0234	0.0656	0.68	0.77	1.17	0.81	3.16	0.89	8.86	0.89
S4L	288	216	0.0050	0.0087	0.0234	0.0656	1.08	0.88	1.87	0.92	5.05	0.98	14.18	0.87
S4M	720	540	0.0033	0.0058	0.0156	0.0437	1.80	0.70	3.12	0.67	8.41	0.70	23.62	0.90
S4H	1872	1123	0.0025	0.0043	0.0117	0.0328	2.81	0.66	4.87	0.66	13.13	0.70	36.86	0.81
S5L														
S5M														
S5H														
C1L	240	180	0.0063	0.0108	0.0292	0.0750	1.13	0.80	1.95	0.82	5.25	0.84	13.50	0.81
C1M	600	450	0.0042	0.0072	0.0194	0.0500	1.87	0.66	3.25	0.67	8.75	0.66	22.50	0.84
C1H	1440	864	0.0031	0.0054	0.0146	0.0375	2.70	0.64	4.68	0.64	12.60	0.68	32.40	0.81
C2L	240	180	0.0050	0.0105	0.0289	0.0750	0.90	0.77	1.89	0.86	5.21	0.91	13.50	0.89
C2M	600	450	0.0033	0.0070	0.0193	0.0500	1.50	0.71	3.16	0.70	8.68	0.69	22.50	0.83
C2H	1440	864	0.0025	0.0053	0.0145	0.0375	2.16	0.64	4.55	0.65	12.51	0.66	32.40	0.79
C3L														
C3M														
C3H														
PC1	180	135	0.0050	0.0087	0.0234	0.0656	0.68	0.79	1.17	0.81	3.16	0.86	8.86	1.00
PC2L	240	180	0.0050	0.0087	0.0234	0.0656	0.90	0.83	1.56	0.89	4.21	0.97	11.81	0.89
PC2M	600	450	0.0033	0.0058	0.0156	0.0438	1.50	0.76	2.60	0.74	7.01	0.73	19.69	0.88
PC2H	1440	864	0.0025	0.0043	0.0117	0.0328	2.16	0.65	3.75	0.66	10.10	0.70	28.35	0.81
RM1L	240	180	0.0050	0.0087	0.0234	0.0656	0.90	0.80	1.56	0.85	4.21	0.92	11.81	0.97
RM1M	600	450	0.0033	0.0058	0.0156	0.0438	1.50	0.73	2.60	0.75	7.01	0.75	19.69	0.80
RM2L	240	180	0.0050	0.0087	0.0234	0.0656	0.90	0.77	1.56	0.81	4.21	0.92	11.81	0.96
RM2M	600	450	0.0033	0.0058	0.0156	0.0438	1.50	0.72	2.60	0.72	7.01	0.72	19.69	0.77
RM2H	1440	864	0.0025	0.0043	0.0117	0.0328	2.16	0.63	3.75	0.65	10.10	0.66	28.35	0.76
URML														
URMM														
MH	120	120	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.60	0.81	1.20	0.89	3.60	0.97	10.50	0.86

Tab. 12 (ANEXO VI) Tabla de valores para curva de fragilidad – Código de diseño sísmico bajo (Low-Code) (FEMA, 2011)

Building Properties			Interstory Drift at				Spectral Displacement (inches)							
Type	Height (inches)		Threshold of Damage State				Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Roof	Modal	Slight	Moderate	Extensive	Complete	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.0050	0.0124	0.0383	0.0937	0.63	0.80	1.56	0.81	4.82	0.88	11.81	1.01
W2	288	216	0.0050	0.0124	0.0383	0.0938	1.08	0.89	2.68	0.89	8.27	0.86	20.25	0.97
S1L	288	216	0.0075	0.0119	0.0253	0.0625	1.62	0.73	2.58	0.73	5.47	0.75	13.50	0.93
S1M	720	540	0.0050	0.0080	0.0169	0.0417	2.70	0.66	4.30	0.70	9.12	0.78	22.50	0.91
S1H	1872	1123	0.0037	0.0060	0.0127	0.0313	4.21	0.64	6.72	0.66	14.23	0.68	35.10	0.86
S2L	288	216	0.0063	0.0100	0.0250	0.0625	1.35	0.89	2.16	0.89	5.40	0.88	13.50	0.97
S2M	720	540	0.0042	0.0067	0.0167	0.0417	2.25	0.67	3.60	0.68	9.00	0.74	22.50	0.92
S2H	1872	1123	0.0031	0.0050	0.0125	0.0313	3.51	0.62	5.62	0.63	14.04	0.68	35.10	0.84
S3	180	135	0.0050	0.0080	0.0201	0.0547	0.68	0.89	1.08	0.90	2.71	0.98	7.38	0.85
S4L	288	216	0.0050	0.0080	0.0200	0.0547	1.08	0.98	1.73	0.95	4.33	0.97	11.81	0.98
S4M	720	540	0.0033	0.0053	0.0134	0.0364	1.80	0.69	2.88	0.72	7.22	0.81	19.68	0.98
S4H	1872	1123	0.0025	0.0040	0.0100	0.0273	2.81	0.66	4.50	0.67	11.26	0.78	30.71	0.93
S5L	288	216	0.0038	0.0075	0.0188	0.0438	0.81	1.00	1.62	1.00	4.05	1.03	9.45	0.91
S5M	720	540	0.0025	0.0050	0.0125	0.0292	1.35	0.74	2.70	0.72	6.75	0.78	15.75	0.94
S5H	1872	1123	0.0019	0.0037	0.0094	0.0219	2.11	0.67	4.21	0.69	10.53	0.74	24.57	0.90
C1L	240	180	0.0063	0.0100	0.0250	0.0625	1.13	0.85	1.80	0.85	4.50	0.88	11.25	0.95
C1M	600	450	0.0042	0.0067	0.0167	0.0417	1.87	0.70	3.00	0.69	7.50	0.75	18.75	0.95
C1H	1440	864	0.0031	0.0050	0.0125	0.0313	2.70	0.66	4.32	0.71	10.80	0.79	27.00	0.95
C2L	240	180	0.0050	0.0096	0.0247	0.0625	0.90	0.91	1.72	0.94	4.44	1.01	11.25	0.90
C2M	600	450	0.0033	0.0064	0.0164	0.0417	1.50	0.76	2.86	0.74	7.40	0.74	18.75	0.94
C2H	1440	864	0.0025	0.0048	0.0123	0.0313	2.16	0.66	4.12	0.67	10.66	0.74	27.00	0.91
C3L	240	180	0.0038	0.0075	0.0188	0.0438	0.68	0.92	1.35	0.99	3.38	1.04	7.88	0.88
C3M	600	450	0.0025	0.0050	0.0125	0.0292	1.12	0.77	2.25	0.79	5.62	0.78	13.12	0.93
C3H	1440	864	0.0019	0.0038	0.0094	0.0219	1.62	0.68	3.24	0.69	8.10	0.70	18.90	0.88
PC1	180	135	0.0050	0.0080	0.0201	0.0547	0.68	0.89	1.08	0.95	2.71	1.00	7.38	0.96
PC2L	240	180	0.0050	0.0080	0.0201	0.0547	0.90	0.98	1.44	0.98	3.61	1.02	9.84	0.91
PC2M	600	450	0.0033	0.0053	0.0134	0.0364	1.50	0.76	2.40	0.75	6.02	0.75	16.40	0.94
PC2H	1440	864	0.0025	0.0040	0.0100	0.0273	2.16	0.66	3.46	0.68	8.66	0.73	23.63	0.92
RM1L	240	180	0.0050	0.0080	0.0201	0.0547	0.90	0.97	1.44	1.01	3.61	1.07	9.84	0.88
RM1M	600	450	0.0033	0.0053	0.0134	0.0364	1.50	0.78	2.40	0.78	6.02	0.78	16.40	0.94
RM2L	240	180	0.0050	0.0080	0.0201	0.0547	0.90	0.94	1.44	0.98	3.61	1.05	9.84	0.89
RM2M	600	450	0.0033	0.0053	0.0134	0.0364	1.50	0.76	2.40	0.75	6.02	0.75	16.40	0.92
RM2H	1440	864	0.0025	0.0040	0.0100	0.0273	2.16	0.66	3.46	0.67	8.66	0.80	23.63	0.89
URML	180	135	0.0038	0.0075	0.0187	0.0438	0.51	0.89	1.01	0.91	2.53	0.96	5.91	1.09
URMM	420	315	0.0025	0.0050	0.0125	0.0292	0.79	0.81	1.57	0.84	3.94	0.87	9.19	0.82
MH	120	120	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.60	0.81	1.20	0.89	3.60	0.97	10.50	0.86

Tab. 13 (ANEXO VI) Tabla de valores para curva de fragilidad – Código de diseño sísmico antiguo (Pre-Code) (FEMA, 2011)

Building Properties			Interstory Drift at				Spectral Displacement (inches)							
Type	Height (inches)		Threshold of Damage State				Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Roof	Modal	Slight	Moderate	Extensive	Complete	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.0032	0.0079	0.0245	0.0600	0.40	1.01	1.00	1.05	3.09	1.07	7.56	1.06
W2	288	216	0.0032	0.0079	0.0245	0.0600	0.69	1.04	1.71	0.97	5.29	0.90	12.96	0.99
S1L	288	216	0.0048	0.0076	0.0162	0.0400	1.04	0.85	1.65	0.82	3.50	0.80	8.64	0.95
S1M	720	540	0.0032	0.0051	0.0108	0.0267	1.73	0.70	2.76	0.75	5.84	0.81	14.40	0.98
S1H	1872	1123	0.0024	0.0038	0.0081	0.0200	2.70	0.69	4.30	0.71	9.11	0.85	22.46	0.93
S2L	288	216	0.0040	0.0064	0.0160	0.0400	0.86	1.01	1.38	0.96	3.46	0.88	8.64	0.98
S2M	720	540	0.0027	0.0043	0.0107	0.0267	1.44	0.73	2.30	0.75	5.76	0.80	14.40	0.98
S2H	1872	1123	0.0020	0.0032	0.0080	0.0200	2.25	0.70	3.59	0.70	8.99	0.84	22.46	0.91
S3	180	135	0.0032	0.0051	0.0128	0.0350	0.43	1.06	0.69	1.03	1.73	1.07	4.73	0.89
S4L	288	216	0.0032	0.0051	0.0128	0.0350	0.69	1.11	1.11	1.03	2.77	0.99	7.56	0.98
S4M	720	540	0.0021	0.0034	0.0086	0.0233	1.15	0.81	1.85	0.80	4.62	0.94	12.60	1.00
S4H	1872	1123	0.0016	0.0026	0.0064	0.0175	1.80	0.73	2.88	0.75	7.21	0.90	19.66	0.97
S5L	288	216	0.0024	0.0048	0.0120	0.0280	0.52	1.20	1.04	1.11	2.59	1.08	6.05	0.95
S5M	720	540	0.0016	0.0032	0.0080	0.0187	0.86	0.85	1.73	0.83	4.32	0.94	10.08	0.99
S5H	1872	1123	0.0012	0.0024	0.0060	0.0140	1.35	0.72	2.70	0.75	6.74	0.92	15.72	0.96
C1L	240	180	0.0040	0.0064	0.0160	0.0400	0.72	0.98	1.15	0.94	2.88	0.90	7.20	0.97
C1M	600	450	0.0027	0.0043	0.0107	0.0267	1.20	0.73	1.92	0.77	4.80	0.83	12.00	0.98
C1H	1440	864	0.0020	0.0032	0.0080	0.0200	1.73	0.71	2.76	0.80	6.91	0.94	17.28	1.01
C2L	240	180	0.0032	0.0061	0.0158	0.0400	0.58	1.11	1.10	1.09	2.84	1.07	7.20	0.93
C2M	600	450	0.0021	0.0041	0.0105	0.0267	0.96	0.86	1.83	0.83	4.74	0.80	12.00	0.98
C2H	1440	864	0.0016	0.0031	0.0079	0.0200	1.38	0.73	2.64	0.75	6.82	0.92	17.28	0.97
C3L	240	180	0.0024	0.0048	0.0120	0.0280	0.43	1.19	0.86	1.15	2.16	1.15	5.04	0.92
C3M	600	450	0.0016	0.0032	0.0080	0.0187	0.72	0.90	1.44	0.86	3.60	0.90	8.40	0.96
C3H	1440	864	0.0012	0.0024	0.0060	0.0140	1.04	0.73	2.07	0.75	5.18	0.90	12.10	0.95
PC1	180	135	0.0032	0.0051	0.0128	0.0350	0.43	1.14	0.69	1.14	1.73	1.17	4.73	0.98
PC2L	240	180	0.0032	0.0051	0.0128	0.0350	0.58	1.14	0.92	1.10	2.31	1.10	6.30	0.93
PC2M	600	450	0.0021	0.0034	0.0086	0.0233	0.96	0.87	1.54	0.83	3.85	0.91	10.50	1.00
PC2H	1440	864	0.0016	0.0026	0.0064	0.0175	1.38	0.74	2.21	0.75	5.55	0.91	15.12	0.96
RM1L	240	180	0.0032	0.0051	0.0128	0.0350	0.58	1.20	0.92	1.17	2.31	1.17	6.30	0.94
RM1M	600	450	0.0021	0.0034	0.0086	0.0233	0.96	0.91	1.54	0.89	3.85	0.89	10.50	0.96
RM2L	240	180	0.0032	0.0051	0.0128	0.0350	0.58	1.14	0.92	1.10	2.31	1.15	6.30	0.92
RM2M	600	450	0.0021	0.0034	0.0086	0.0233	0.96	0.89	1.54	0.87	3.85	0.87	10.50	0.96
RM2H	1440	864	0.0016	0.0026	0.0064	0.0175	1.38	0.75	2.21	0.75	5.55	0.84	15.12	0.94
URML	180	135	0.0024	0.0048	0.0120	0.0280	0.32	1.15	0.65	1.19	1.62	1.20	3.78	1.18
URMM	420	315	0.0016	0.0032	0.0080	0.0187	0.50	0.99	1.01	0.97	2.52	0.90	5.88	0.88
MH	120	120	0.0032	0.0064	0.0192	0.0560	0.38	1.11	0.77	1.10	2.30	0.95	6.72	0.97

ANEXO VII: Análisis de perfiles metálicos de las estacione de bombero

Este ANEXO será presentado de forma digital debido a la extensión de este. Los archivos se mostrarán en una carpeta comprimida y serán presentados en formato Excel. Cada archivo contendrá el procedimiento completo para estimación de riesgo donde se encontrarán en diferentes pestañas según el siguiente orden:

- Medrado de cargas en la cobertura
- Cálculo del cortante en la base
- Resistencia al corte en la soldadura
- Resumen de resultados
- Cortante en el perfil metálico
- Propiedades de la sección
- Verificación del análisis

ANEXO VIII: Desarrollo de la estimación de riesgo para todas las estaciones de bombero analizadas

Este ANEXO será presentado de forma digital debido a la extensión de este. Los archivos se mostrarán en una carpeta comprimida y serán presentados en formato Excel. Cada archivo contendrá el procedimiento completo para estimación de riesgo donde se encontrarán en diferentes pestañas según el siguiente orden:

- Ficha de datos
- Desarrollo de curva de capacidad y definición de estados de daño,
- Grafica de la curva de fragilidad,
- Grafica de la curva de vulnerabilidad,
- Estimación del peligro sísmico y espectro de demanda sísmica,
- Grafica de combinación de espectro de capacidad y espectro de demanda,
- Estimación de riesgo y pérdidas económicas y,
- Grafica de ubicación del porcentaje de daño en curva de vulnerabilidad.

ANEXO IX: Desarrollo de la estimación de riesgo para las coberturas metálicas

Este ANEXO será presentado de forma digital debido a la extensión de este. Los archivos se mostrarán en una carpeta comprimida y serán presentados en formato Excel. Cada archivo contendrá el procedimiento completo para estimación de riesgo donde se encontrarán en diferentes pestañas según el siguiente orden:

- Desarrollo de curva de capacidad y definición de estados de daño,
- Grafica de la curva de fragilidad,
- Grafica de la curva de vulnerabilidad,
- Estimación del peligro sísmico y espectro de demanda sísmica,
- Grafica de combinación de espectro de capacidad y espectro de demanda,
- Estimación de riesgo y pérdidas económicas y,
- Grafica de ubicación del porcentaje de daño en curva de vulnerabilidad.

ANEXO X: Cálculo de la exposición de las estructuras de estaciones de bombero – Valor económico

Tab. 14 (ANEXO X) Costo por m2 construido en dólares (Extraído de IDIC)

COSTO DE METRO CUADRADO DE CONSTRUCCIÓN POR TIPO Y AMBIENTE					
COSTOS ESTIMADOS EN DÓLARES AMERICANOS. TIPO DE CAMBIO = 3.3					
	LUJOSO	DE PRIMERA	MEDIA	NORMAL	ECONÓMICA
SALA	+ ESTUDIO + RECEPCIÓN + SS.HH. VISITA	+ ESTUDIO + RECEPCIÓN + SS.HH. VISITA	+ RECEPCIÓN + SS.HH. VISITA	+ SS.HH. VISITA	
	73.96	40.24	22.54	17.42	8.21
COMEDOR	+ BAR	+ BAR			
	31.22	18.91	13.66	14.17	10.37
COCINA	+ COMEDOR DIARIO + PATIO / LAVAND. + DORMIT. SERVICIO + SS.HH. SERVICIO	+ COMEDOR DIARIO + PATIO / LAVAND. + DORMIT. SERVICIO + SS.HH. SERVICIO	+ PATIO / LAVAND.	+ PATIO / LAVAND.	
	70.87	63.20	33.53	18.77	11.21
DORMITORIO	+ SS.HH. + VESTIDOR	+ SS.HH. + CLOSET	+ SS.HH. + CLOSET	+ SS.HH. + CLOSET	+ SS.HH. COMPARTIDO
	57.26	40.94	33.87	26.37	14.46
HABITACIÓN	2 DORMITORIOS CLOSET SALA ESTAR 2 SS.HH.	2 DORMITORIOS CLOSET SALA ESTAR 2 SS.HH.	2 DORMITORIOS 1 SS.HH.	1 DORMITORIO 1 SS.HH.	1 DORMITORIO SS.HH. COMPARTIDO
	113.86	89.07	48.18	25.41	13.26
CASCO	Todo en material noble de acuerdo a las normas sismorresistente, ACI y R.N.E.				
	274.24	251.05	231.72	204.85	169.21
COSTO DE M2 POR TIPO	621.41	503.40	383.49	306.99	226.71

Tab. 15 (ANEXO X) Estimación de valor económico de estructuras (Elaboración propia)

Estimación de valor económico de estaciones de bombero

#	Estación	Distrito	Area de terreno (m2)	Area construida (m2)	# Pisos	Area const. Concreto (m2)	Area const. Cobertura (m2)	Area const. Acero (m2)	Area const. Drywall (m2)	Area construida Adobe (m2)	Costo m2 construido (\$/.)					Costo total estructura (\$/.)
											Concreto	Cobertura	Acero	Drywall	Adobe	
1	Sede de Comandancia Departamental Lima	Cercado de Lima	323	323	2					646					S/. 166.99	S/. 107,875.54
2	B-2 Roma	Cercado de Lima	540	540	2					1080					S/. 166.99	S/. 180,349.20
3	B-4 Lima	Lince	375	375	4	1500					S/. 1,078.17					S/. 1,617,261.00
4	B-8 Victoria	La Victoria	440	440	2	703	177				S/. 766.22	S/. 33.00				S/. 544,494.08
5	B-14 Internacional	Breña	661	606	3	1818					S/. 1,078.17					S/. 1,960,120.33
6	B-36 Magdalena	Pueblo Libre	430	430	3	1290					S/. 863.12					S/. 1,113,425.57
7	B-83 San Miguel	San Miguel	620	381	1		104	104	277			S/. 33.00	S/. 217.00	S/. 85.00		S/. 49,545.00
8	B-100 San Isidro	San Isidro	525	525	2	560	245				S/. 1,078.17	S/. 33.00				S/. 611,862.44
9	B-121 San Juan de Lurigancho	San Juan de Lurigancho	1600	868	1	418	450	450					S/. 217.00			S/. 97,650.00
10	B-127 Salamanca	Ate	723	327	2	398	128				S/. 1,078.17	S/. 33.00				S/. 433,337.25
11	B-176 El Agustino	El Agustino	400	400	2	246	277	277			S/. 863.12	S/. 33.00	S/. 217.00			S/. 281,577.52
12	B-202 Waldo Hernan Olivos V.	Jesus Maria	495	495	1	147	348				S/. 1,078.17	S/. 33.00				S/. 169,975.58
13	Sede de Comandancia Departamental Callao	Bellavista	1792	727	3	1383	266				S/. 1,078.17	S/. 33.00				S/. 1,499,892.64
14	B-1 Union Chalaca	Cercado del Callao	620	620	4	2480					S/. 766.22					S/. 1,900,227.09
15	B-5 Italia	Bellavista	1792	727	3	1383	266				S/. 1,078.17	S/. 33.00				S/. 1,499,892.64
16	B-7 Garibaldi	La Perla	810	660	2	830	245				S/. 1,078.17	S/. 33.00				S/. 902,969.42
17	B-9 Salvadora Callao	Callao	1650	387	1		165	165	186			S/. 33.00	S/. 217.00	S/. 85.00		S/. 57,060.00
18	B-15 Callao	Callao	192	192	3	576					S/. 863.12					S/. 497,157.47
19	B-18 Peru	Callao	735	735	3	2205					S/. 863.12					S/. 1,903,180.92
20	B-34 La Punta	La Punta	730	730	3	2190					S/. 863.12					S/. 1,890,234.11
21	B-60 Antonio Alarco Espinoza	Bellavista	350	350	3	549	167				S/. 863.12	S/. 33.00				S/. 479,364.21
22	B-75 Tecnico Lorenzo Giraldo Vega	Ventanilla	388	388	3	402	254				S/. 863.12	S/. 33.00				S/. 355,356.48
23	B-184 Brigadier CBP Alejandro Reyes Leon	Mi Peru	825	591	1		248	248	343			S/. 33.00	S/. 217.00	S/. 85.00		S/. 91,155.00
24	B-207 Adolfo Martin King Leoane	Ventanilla	1194	757	3	975	432				S/. 1,078.17	S/. 33.00				S/. 1,065,475.65
25	B-232 Pachacutec	Ventanilla	932	185	1				185					S/. 85.00		S/. 15,725.00
26	Sede Comandancia Departamental Lima Sur	San Borja	285.6	174.6	2	349.2					S/. 1,395.65					S/. 487,361.22
27	B-6 Garibaldi	Chorrillos	284	284	3	852					S/. 1,078.17					S/. 918,604.25
28	B-11 Cosmopolita	Surquillo	1670	912	2	696	564				S/. 1,078.17	S/. 33.00				S/. 769,021.10
29	B-13 Olaya	Chorrillos	1900	494	1	253.6				236	S/. 863.12				S/. 166.99	S/. 258,296.87
30	B-28 Miraflores	Miraflores	935	778	2	1184	186	186			S/. 1,078.17	S/. 33.00	S/. 217.00			S/. 1,323,058.02
31	B-96 La Molina	La Molina	1050	634	2	928	170				S/. 1,395.65	S/. 33.00				S/. 1,300,773.85
32	B-105 Villa el Salvador	Villa el Salvador	883	401	2	614	401	401			S/. 863.12	S/. 33.00	S/. 217.00			S/. 630,205.68
33	B-106 Villa Maria del Triunfo	Villa Maria del Triunfo	2000	952	2	656	661	661			S/. 863.12	S/. 33.00	S/. 217.00			S/. 731,456.72
34	B-120 San Juan de Miraflores	San Juan de Miraflores	1146	562	2	575	216	216			S/. 863.12	S/. 33.00	S/. 217.00			S/. 550,294.00
35	B-134 Santiago Apostol	Santiago de Surco	476	476	3	476					S/. 1,395.65					S/. 664,329.73
36	Sede Comandancia Departamental Lima Norte	Los Olivos	1250	1250	2			1250					S/. 450.00			S/. 562,500.00
37	B-65 San Martin de Porres	San Martin de Porres	1474	620	1	620					S/. 1,078.17					S/. 668,467.88
38	B-124 Comas	Comas	600	500	2	586	207				S/. 863.12	S/. 33.00				S/. 512,619.67
39	B-161 Los Olivos	Los Olivos	1250	1250	2			1250					S/. 450.00			S/. 562,500.00
40	B-168 Independencia	Independencia	240	240	2	248	116				S/. 641.09	S/. 33.00				S/. 162,818.42

ANEXO XI: Comparación de la metodología con modelamiento en ETABS

Para poder revisar la confiabilidad de los resultados obtenidos se elaboro un modelo en el programa ETABS y así comparar la curva de capacidad de ambas metodologías.

El proceso seguido para poder obtener la curva de capacidad con el programa ETABS se detalla líneas abajo.

1. Identificar las características estructurales de la estación por medio de un levantamiento en campo. La resistencia del concreto y los refuerzos de acero se han asumido ya que no se tenían los instrumentos para poder obtener el valor real.

Tab. 1 (ANEXO XI) Valores estructurales para el modelamiento (Elaboración propia)

Ítem	Descripción
Año de construcción	2001
Numero de pisos	3
Altura de edificación	5.4
Área aproximada (m2)	240
Luz mayor / Luz de salida (m2)	8.50 / 8.35
Sistema estructural	Pórticos
Material predominante	Concreto
Espesor de losa (cm)	20
Dimensión de columnas (cm)	40x40
Dimensión de vigas (cm)	30x40
Resistencia de concreto (kg/cm2)	210
Refuerzo de acero en columnas	4 varillas Ø1/2"
Refuerzo de acero en vigas	4 varillas Ø1/2"

2. Modelar los elementos de concreto armado según características estructurales, de acuerdo a la información indicada en el punto 1.

Fig. 1(ANEXO XI) Modelo en ETABS (Elaboración propia)

3. Definir y asignar las cargas, las rótulas plásticas en las columnas y finalmente obtener la curva de capacidad.

Fig. 2(ANEXO XI) Curva de capacidad obtenida del ETABS (Elaboración propia)

4. Finalmente se hace la comparación de la curva de capacidad obtenida con el programa ETABS y la obtenida con la metodología del HAZUS.

Fig. 3 (ANEXO XI) Comparativa entre curvas de capacidad (Elaboración propia)

Como se puede observar la curva de capacidad obtenida con el programa ETABS, presenta una tendencia diferente al gráfico obtenido con la metodología HAZUS. Esto es debido a que la metodología HAZUS presenta algunas limitaciones y aproximaciones que distorsionan el resultado y lo alejan de la realidad. La principal es que los parámetros que plantea HAZUS para graficar la curva de capacidad corresponden a los materiales de Estados Unidos, que no son necesariamente los mismos que utilizamos en el Perú.

Sin embargo, la metodología utilizada en la presente investigación nos permite obtener un índice general del posible comportamiento estructural de una edificación frente a un sismo específico.

ANEXO XII: Artículo presentado y publicado en el CONIITI 2018

El presente ANEXO se muestra el artículo científico que salió como resultado de la presente investigación y ha sido presentado en el “Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería” en Bogotá, Colombia en el 2018 y publicado en la biblioteca digital *IEEE XPLORE* ®. Además del artículo, se adjunta la presentación que se mostró en la conferencia.