

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE VIVIENDAS SOBRE PIRCAS EN  
UN ASENTAMIENTO HUMANO EN EL DISTRITO DE VILLA MARÍA DEL  
TRIUNFO**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil**

**AUTOR:**

Vladimir Ramos Clemente

**ASESORA:**

Sandra Cecilia Santa Cruz Hidalgo

Lima, Enero, 2021

## **RESUMEN**

En la ciudad de Lima, la expansión urbana no planificada ha ocasionado que la población más desfavorecida ocupe terrenos precarios en zonas inseguras como las laderas de cerros; es por ello, que para nivelar estos terrenos y construir sus viviendas, los pobladores construyen muros de piedra con junta seca, conocidos como “pircas”. Asimismo, esta ciudad se encuentra en la zona con mayor actividad sísmica en el mundo, conocida como el Cinturón de Fuego del Pacífico. Es así que, la vulnerabilidad del sistema vivienda-pirca, producto de la informalidad e improvisación en su construcción, se superpone al peligro sísmico generando un alto riesgo en la población, lo cual puede traducirse en lamentables pérdidas humanas y materiales.

El presente trabajo consiste en la evaluación del riesgo sísmico de las viviendas del AAHH Edén del Manantial ubicado en el distrito de Villa María del Triunfo. La evaluación consistió en la caracterización espacial de peligro, vulnerabilidad y exposición, y en la superposición de esta información con un enfoque probabilístico. En primer lugar, se realizó la estimación del peligro sísmico de la zona siguiendo la metodología de evaluación probabilística del peligro sísmico, PSHA, por sus siglas en inglés. En segundo lugar, la vulnerabilidad de estas estructuras se estimó a través de los resultados experimentales de ensayos estáticos realizados a escala natural a dos tipologías definidas, pircas de 1m y 1.5m de altura. Finalmente, la información de los elementos expuestos, fue obtenida de la base de datos de instituciones públicas como son el INEI y el COFOPRI. La evaluación de riesgo fue realizada utilizando el software CAPRAGIS v2.4.0.

Los resultados indican que los sistemas vivienda-pirca son altamente riesgosos y frágiles debido a que ante un sismo frecuente las pircas de 1.5m de altura colapsarían en su totalidad mientras que las pircas de 1m de altura presentarían un daño promedio de alrededor del 85%, asimismo, ante sismos ocasionales la totalidad de ambos sistemas ya se encontrarían colapsados. En ese sentido, se recomienda limitar el uso de pircas a construcciones temporales. Sin embargo, su uso podría ser ventajoso en otros espacios, en los cuales no se ponga en alto riesgo vidas humanas, como por ejemplo, terrazas de agricultura, construcciones en espacios públicos o áreas naturales protegidas, debido a que la construcción de las pircas tiene un bajo impacto en el medio ambiente y su costo es relativamente bajo en comparación con las estructuras tradicionales.

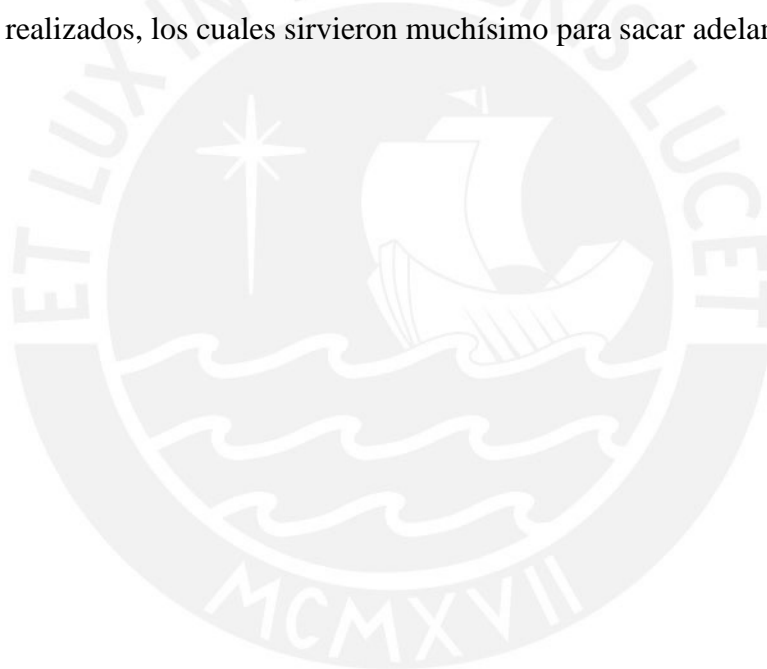
## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco a Dios por ser guía en mi camino y luz en todo momento.

Agradezco a mis padres, Celso y Vilma por su apoyo incondicional y su amor en todo el trajinar de mi vida.

Agradezco de manera especial a mi asesoría de tesis, la Dra. Sandra Santa Cruz por su predisposición, recomendaciones, ayuda continua y consejos de vida en todo el proceso de realización de este presente trabajo de investigación.

Asimismo, agradezco al proyecto N° 109-2017 – FONDECYT “Validación de técnicas de construcción de pircas mediante estudios numérico-experimentales con tecnología desarrollada en Perú” por darme la oportunidad de formar parte de los estudios y experimentos realizados, los cuales sirvieron muchísimo para sacar adelante esta tesis.



## ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Objetivos .....	4
1.3 Alcances .....	5
1.4 Hipótesis.....	5
1.5 Justificación.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	7
2.1 Análisis de riesgo sísmico .....	7
2.1.1 Peligro sísmico .....	8
2.1.2 Vulnerabilidad sísmica.....	15
2.2 Análisis pseudoestático .....	17
2.2.1 Método de Saragoni .....	18
2.2.2 Método de Mononobe Okabe .....	18
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....	20
3.1 Caso de estudio .....	22
3.2 Caracterización de las pircas representativas de la zona de estudio.....	23
3.2.1 Descripción de las pircas de ensayo .....	24
3.2.2 Proceso constructivo .....	25
3.2.3 Evaluación experimental de las pircas .....	26
3.3 Estimación de la intensidad de movimiento.....	27
3.3.1 Aceleración máxima del terreno (PGA, por sus siglas en inglés) .....	27
3.3.2 Aceleración máxima del terreno en ladera (PGA*) .....	28
3.4 Cálculo de vulnerabilidad sísmica de las pircas.....	29
3.5 Evaluación del riesgo sísmico .....	32
CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE RIESGO SÍSMICO EN EL ASENTAMIENTO HUMANO EDÉN DEL MANANTIAL .....	33
4.1 Caracterización de las pircas de la zona de estudio.....	33
4.1.1 Proceso constructivo de pircas .....	33
4.1.2 Porcentaje de vacíos .....	41
4.2 Estimación de la intensidad de movimiento.....	43
4.2.1 Máxima aceleración del terreno (PGA).....	44
4.2.2 Amplificación sísmica por efectos topográficos (PGA*).....	46
4.3 Cálculo de vulnerabilidad sísmica de las pircas.....	48
4.3.1 Resultados de ensayos en mesa inclinable para ensayos estáticos .....	48
4.3.2 Curvas de capacidad.....	49
4.3.3 Método Pseudoestático.....	51

4.3.4	Curvas de daño y desviación estándar.....	53
4.3.5	Comparación .....	55
4.4	Exposición.....	56
4.4.1	Mapa de pendientes .....	60
4.4.2	Costo de reposición .....	65
4.5	Efectos de sitio .....	67
4.6	Resultados .....	68
4.6.1	Análisis Probabilístico.....	69
4.6.2	Análisis Determinístico: Sismo Frecuente .....	73
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....		76
5.1	Proceso constructivo de pircas .....	76
5.2	Porcentaje de vacíos .....	78
5.3	Peligro sísmico .....	78
5.3.1	Aceleración máxima del terreno (PGA).....	79
5.3.2	Aceleración máxima del terreno en ladera (PGA*) .....	79
5.4	Vulnerabilidad sísmica.....	80
5.4.1	Curvas de fragilidad .....	80
5.4.2	Curvas de daño esperado.....	80
5.5	Exposición.....	81
5.6	Evaluación de riesgo sísmico .....	82
5.6.1	Pérdida Anual Esperada (PAE).....	83
5.6.2	Pérdidas Máximas Probables (PML).....	84
CAPITULO VI: CONCLUSIONES .....		85
REFERENCIAS .....		87
ANEXOS .....		91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Viviendas informales en Carabayllo, Lima, Perú. Fuente: PuntoEdu (2019)	1
Figura 2. Sistema de vivienda, pirca y terraza. Fuente: Alcántara (2020)	2
Figura 3. Pirca en Sechín, Ancash. Fuente: Archivo personal Santa Cruz (2019)	2
Figura 4. Pircas en el Sillar de Arequipa. Fuente: Archivo personal Santa Cruz (2019)	3
Figura 5. Pirca informal sin junta entre bloques. Fuente: Roca (2008)	3
Figura 6. Colapso de pirca en AA.HH Siglo XXI en San Juan de Lurigancho. Fuente: Runa (2007)	4
Figura 7. Factores que intervienen para la evaluación del riesgo sísmico. Fuente: CAN (2014)	7
Figura 8. Sismos de subducción (interplaca e intraplaca) y sismos de corteza superficial.	9
Figura 9. Fuentes sismogénicas definidas por el IGP. Fuente: IGP (2014)	10
Figura 10. Ley de Gutenberg – Richter. Fuente: Alva (2020)	11
Figura 11. Amplificaciones de onda sísmica en un talud. Fuente: Ashford y Sitar (1997)	13
Figura 12. (a) Resultados obtenidos para factor de amplificación ( $S_T$ ) en cresta de talud por efecto topográfico, (b) Factores de amplificación topográfica recomendados por el Eurocódigo 8. Fuente: Pagliaroli et al., (2007)	14
Figura 13. (a) Esquema gráfico de amplificación topográfica, (b) Conjunto Habitacional Canal de Beagle en Terremoto 1985, Chile. Fuente: Muñoz (2019)	14
Figura 14. Curvas de vulnerabilidad para viviendas sobre pircas. Fuente: Zanelli (2019)	17
Figura 15. Nomenclatura para la utilización del método de Mononobe Okabe. Fuente: Suarez (2006)	19
Figura 16. Diagrama de flujo de la metodología	21
Figura 17. (a) Mapa urbano Villa María del Triunfo. Fuente: MVMT (2016), (b) Asentamiento Humano Edén del Manantial. Fuente: COFOPRI (2007)	22
Figura 18. Ubicación del Asentamiento Humano Edén del manantial. Fuente: Geollaqta	23
Figura 19. Pircas de la zona de Villa María del Triunfo. Fuente: Archivo personal Santa Cruz (2019)	24
Figura 20. Área de construcción y ensayo.	25
Figura 21. (a) Mesa inclinable para ensayos estáticos. Fuente: Proyecto N° 2017-109-FONDECYT	26
Figura 22. Mesa inclinable para ensayos estáticos, Campus USIL	27
Figura 23. Curvas de vulnerabilidad sísmica de pircas características, (a) Considerando relleno en toda la altura y (b) Considerando relleno a la mitad de la altura. Fuente: Zanelli (2019)	30
Figura 24. Habilitación de rocas en Villa María del Triunfo	34
Figura 25. Descarga de las rocas dentro del lugar de trabajo.	35
Figura 26. Colocación de piedras en la base	35

Figura 27. Verificación de ancho de muro	36
Figura 28. Colocación de piedras en base de muro.	37
Figura 29. (a) Pirca con relleno interior sin “through stones”, (b) Pirca con empleo de “through stones”. Fuente: McCombie et al. (2015)	37
Figura 30. Through stone en pirca ensayada a escala natural. Fuente: Proyecto N° 109-2017-FONDECYT	38
Figura 31. Forma de construcción de las pircas	39
Figura 32. Proceso de encaje de bloques mediante cuñas.	39
Figura 33. (a) Pirca con junta seca sin acabado, (b) Pirca con acabado de mortero de cemento “pañeteo” Fuente: Rivas (2019)	40
Figura 34. Copping stones. Fuente: McCombie et al. (2015)	40
Figura 35. (a) Medidas de Pirca 1 (b) Medidas de Pirca 2	41
Figura 36. (a) Trazado de medidas preliminares (b) Verificación de medidas establecidas	42
Figura 37. Calculo experimental de la densidad de la muestra 3	42
Figura 38. Mapa de peligro sísmico para Lima Metropolitana (Tr = 75 años)	44
Figura 39. Espectro de peligro uniforme para los cuatro sismos de diseño	45
Figura 40. Espectros de peligro uniforme obtenido de SENCICO	45
Figura 41. Vista aérea del asentamiento humano Edén del Manantial. Fuente: Google Earth	46
Figura 42. Perfil topográfico de la ladera en zona de estudio	47
Figura 43. Distribución de puntos de medida muro tipo 1 (H=1 m)	48
Figura 44. Distribución de puntos de medida muro tipo 2 (H= 1.5m)	48
Figura 45. Curva de capacidad para muros tipo 1 (H = 1m).	50
Figura 46. Curvas de capacidad para muros tipo 2 (H = 1.5m)	51
Figura 47. Fuerzas analizadas en pircas	52
Figura 48. Curvas de Fragilidad	53
Figura 49. Funciones de valor esperado	54
Figura 50. Curvas de daño esperado experimentales y analíticas. Fuente: Zanelli (2019)	55
Figura 51. Curvas de daño esperado de pircas y viviendas	56
Figura 52. Mapa catastral a nivel de lotes. Fuente: COFOPRI (2007)	57
Figura 53. Mapa a nivel de manzanas. Fuente: INEI (2017)	58
Figura 54. Clasificación de acuerdo al sistema estructural. Fuente: INEI (2017)	59
Figura 55. Mapa de pendientes del AAHH Edén del Manantial	61
Figura 56. Perfil de la construcción de pircas (Corte y relleno). Fuente: MML (2013)	62
Figura 57. Sistemas estructurales en el Asentamiento Humano Edén del Manantial	63
Figura 58. Mapa temático de los sistemas estructurales para la evaluación de riesgo sísmico	64
Figura 59. Efectos de sitio debido a la topografía	67
Figura 60. Plataforma CAPRAGIS v.2.4.0	68

Figura 61. Resultados de la evaluación de riesgo sísmico: Plataforma CAPRAGIS	69
Figura 62. Pérdida Anual Esperada (PAE) por sistema estructural	70
Figura 63. Mapa de riesgo sísmico del asentamiento humano Edén del Manantial	71
Figura 64. Pérdidas Máximas Probables (PML)	72
Figura 65. Isoaceleraciones para escenario 2700. Sismo frecuente	73
Figura 66. Resultados de la evaluación de riesgo sísmico: Plataforma CAPRAGIS	74
Figura 67. Escenario 2700: Sismo frecuente (Tr = 45 años)	75
Figura 68. (a) Pirca con piedras redondeadas (b) Pirca con piedras angulosas	76
Figura 69. Recomendación de la altura de pircas. Fuente: Municipalidad Metropolitana de Lima (2013)	84





## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones de pircas típicas	23
Tabla 2. Dimensiones de las pircas ensayadas	25
Tabla 3. Sismos de diseño, propuestos por el SEAOC Visión 2000	28
Tabla 4. Aceleraciones estimadas para la costa oeste de América del Sur	28
Tabla 5. Clasificación de sistemas estructurales	31
Tabla 6. Resultados obtenidos en las 6 muestras	43
Tabla 7. Porcentaje de vacíos en ambas pircas	43
Tabla 8. PGA amplificado por efecto topográfico	47
Tabla 9. Obtención del peso de pirca para ambas tipologías	49
Tabla 10. Ángulo y fuerza horizontal de colapso para muro tipo 1 (H = 1m)	49
Tabla 11. Ángulo y fuerza horizontal de colapso para muro tipo 1 (H = 1.5m)	49
Tabla 12. Resultados promedios para muro tipo 1 (H = 1m), espécimen N° 1	50
Tabla 13. Fuerzas resultantes en porcentaje respecto del peso del muro	52
Tabla 14. Aceleración sísmica de colapso	53
Tabla 15. Cantidad de viviendas según el sistema estructural	59
Tabla 16. Pendientes asociadas al terreno	60
Tabla 17. Pendientes asociadas a la altura de pircas	62
Tabla 18. Costo por m <sup>2</sup> de área techada de vivienda	66
Tabla 19. Rendimiento por tipo de pirca	66
Tabla 20. Precio por metro lineal de pirca de 1m	66
Tabla 21. Precio por metro lineal de pirca de 1.5m	67
Tabla 22. Pérdida Anual Esperada de la cartera de viviendas	70
Tabla 23. Pérdidas anuales esperadas (PAE) por sistema estructural	70
Tabla 24. Pérdidas probables por periodo de retorno	72
Tabla 25. Pérdidas esperadas por escenario (ESL)	74
Tabla 26. Comparación del PGA obtenido en la investigación con el proporcionado por el SENCICO	79
Tabla 27. Incremento de la PAE para viviendas sobre pircas	83

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

La ciudad de Lima ha experimentado una gran expansión no planificada a causa del crecimiento repentino de su población, lo cual generó que esta opte por ocupar terrenos precarios en ámbitos geográficos inseguros como son las laderas de cerros (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2010). En esa misma línea, alrededor del 30% de la población de la ciudad de Lima, cerca de 3 millones de personas, viven sobre laderas de cerros en zonas de la periferia de la ciudad conocidas como asentamientos humanos (Paredes, 2016). A modo de ejemplo, en la Figura 1 se observa el panorama común en muchas zonas de la periferia de Lima, en donde se evidencia el riesgo latente que sufre esta población ante el probable acontecimiento de algún evento físico de diverso origen, tales como sismos, huaycos, caídas de rocas entre otros.



*Figura 1. Viviendas informales en Carabaylo, Lima, Perú. Fuente: PuntoEdu (2019)*

Las construcciones informales realizadas en estas áreas inseguras están constituidas por 2 elementos: vivienda y terraza tal como se muestra en la Figura 2. La vivienda está conformada generalmente por materiales livianos como calaminas, triplay, madera entre otros. Asimismo, la terraza consiste en un relleno no controlado sostenido por un muro de contención temporal, denominado “pirca” (Alcántara, 2020). En ese sentido, la informalidad e improvisación de este sistema vivienda-pirca genera en la mayoría de los casos un alto grado de vulnerabilidad debido a que son autoconstrucciones realizadas sin supervisión técnica y construidas con materiales no regulados y de cuestionable calidad (Zanelli, 2019).

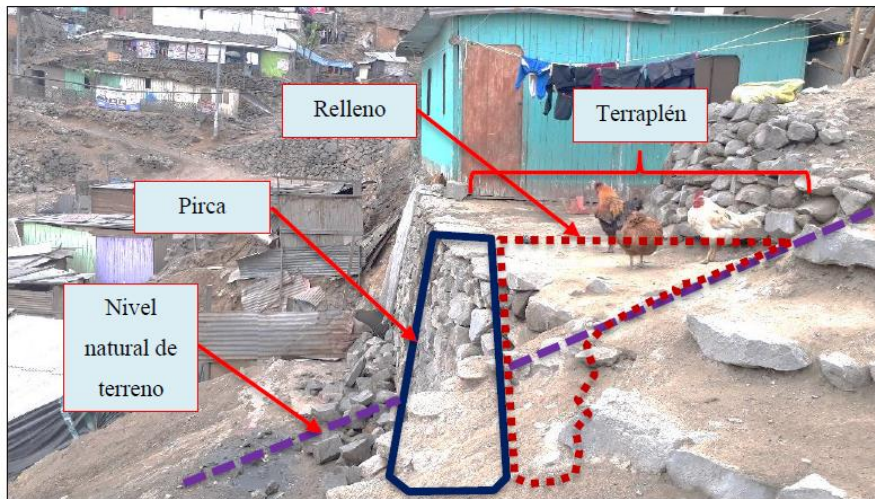


Figura 2. Sistema de vivienda, pirca y terraza. Fuente: Alcántara (2020)

Las pircas son un tipo de muros de piedra con junta seca (DSRW, por sus siglas en inglés). Estos muros rudimentarios están compuestos por bloques de roca que soportan rellenos con cargas de viviendas, caminos o terrazas de agricultura y comúnmente no poseen ningún conglomerante entre los bloques (McCombie et al., 2015). Asimismo, su método de construcción en el Perú es variable e informal, el cual depende de la experiencia y pericia de sus constructores, conocidos como “maestros pirqueros”. En las Figura 3 y 4 se pueden observar pircas en distintos departamentos del Perú, lo cual demuestra su uso arraigado desde tiempos antiguos hasta la actualidad.



Figura 3. Pirca en Sechín, Ancash. Fuente: Archivo personal Santa Cruz (2019)





*Figura 4. Pirca en el Sillar de Arequipa. Fuente: Archivo personal Santa Cruz (2019)*

En el Perú existen guías para la habilitación urbana como la realizada por la Municipalidad Metropolitana de Lima (2013), en la cual se recomiendan ciertos parámetros y dimensiones para estas estructuras de contención. Sin embargo, hace falta cierta norma o reglamento que regule su construcción y que garantice su comportamiento adecuado frente a eventos sísmicos. En la Figura 5 se observa una pirca típica para habilitación de vivienda construida con bloques de roca de tamaño reducido ubicada sobre una ladera de pendiente considerable; asimismo, se logra apreciar la alta informalidad de las viviendas cuyos materiales están constituidos por esteras, triplay y madera. Ambas características manifiestan el alto grado de fragilidad y percepción del riesgo presente en este tipo de estructuras; por lo cual, es de suma importancia generar estudios de reduzcan la vulnerabilidad de estos sistemas informales y reglamenten su uso y aplicación.



*Figura 5. Pirca informal sin junta entre bloques. Fuente: Roca (2008)*

La ciudad de Lima está ubicada dentro de la zona con mayor actividad sísmica en el mundo, conocida como el Cinturón de Fuego del Pacífico; es por ello, la importancia de la evaluación del riesgo sísmico en estructuras informales de este tipo debido a la alta probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos en la zona. Del mismo modo, es frecuente que las pircas presenten fallas ante sismos de poca intensidad tal como se muestra en la Figura 6 donde se produjo el colapso de una pirca ante el sismo de magnitud 7.9 Mw escala momento con epicentro en la ciudad de Pisco (2007). Asimismo, las pircas al ser estructuras inestables pueden presentar fallas incluso ante cargas de servicio o ante sobrepresiones hidrostáticas generadas por precipitaciones.



*Figura 6. Colapso de pirca en AA.HH Siglo XXI en San Juan de Lurigancho. Fuente: Runa (2007)*

## **1.2 OBJETIVOS**

El objetivo general es evaluar mediante un enfoque probabilístico el riesgo sísmico de viviendas sobre muros de piedra con junta seca en el Asentamiento Humano Edén del Manantial.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- a) Documentar y caracterizar el proceso constructivo de las pircas de la zona representativa de estudio
- b) Estimar el peligro sísmico de la zona de estudio considerando el efecto topográfico mediante el método de análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA, por sus siglas en inglés)

- c) Obtener curvas fragilidad y daño esperado de pircas a partir de estudios previos experimentales y numéricos
- d) Evaluar el riesgo sísmico mediante un análisis probabilístico.

### **1.3 ALCANCES**

Se realizará la evaluación del riesgo sísmico de viviendas sobre muros de piedra en junta seca para el Asentamiento Humano Edén del Manantial ubicado en el distrito de Villa María del Triunfo. Para esto se utilizará información experimental de 2 tipologías: pircas de 1m y 1.5m de altura respectivamente, las cuales fueron construidas a escala natural y ensayadas en una mesa inclinable para ensayos estáticos. Asimismo, se estimará el peligro sísmico de la zona de estudio considerando el factor de amplificación debido a la topografía del terreno y además se obtendrá curvas vulnerabilidad de las pircas caracterizadas a partir de investigaciones previas y ensayos experimentales.

### **1.4 HIPÓTESIS**

Hipótesis principal:

Los muros de piedra en junta seca son altamente frágiles y vulnerables ante eventos sísmicos. En consecuencia, ante un sismo de recurrencia ocasional existe una alta probabilidad de que estas estructuras colapsen totalmente o se produzcan daños severos.

Hipótesis específicas:

- La construcción de pircas es variable y depende principalmente de la experiencia y pericia de los maestros pirqueros.
- La vulnerabilidad de las pircas es muy alta debido a la informalidad de su construcción no tecnificada y al empleo de materiales no controlados.
- Las pircas son más vulnerables que las viviendas construidas sobre esta, lo cual implica que la función de daño esperado ante un evento sísmico estará gobernada por la respuesta del primer elemento.
- La amplificación sísmica producida por las condiciones topográficas de la zona incrementará significativamente el parámetro de intensidad (PGA) ocasionado por el sismo.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

La ciudad de Lima se encuentra dentro de la zona de mayor actividad sísmica en el mundo, conocida como cinturón de Fuego del Pacífico. Esta actividad se produce debido a la subducción de placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana, lo cual explica el origen de la gran actividad sísmica (Tavera et al., 2014). Por ello, surge la necesidad de conocer el comportamiento sísmico de estructuras vulnerables, como las viviendas informales sobre pircas, construidas generalmente en laderas de asentamientos humanos sin asesoramiento técnico ni empleo de materiales de construcción reglamentados. Según Paredes (2016), estas viviendas informales albergan a más del 30% de la población limeña, esto implica que cerca de 3 millones de limeños se encontrarían en zonas de alto riesgo ante un inminente evento sísmico.

En ese sentido, la construcción informal de estas estructuras y su exposición ante peligros naturales, como los sismos, contribuyen conjuntamente en aumentar el riesgo sísmico en estos sectores informales, el cual puede cuantificarse en pérdidas económicas y pérdidas de vidas humanas. Por lo tanto, existe una necesidad imperante de establecer cierta normativa que regule y garantice el diseño y la construcción de estas estructuras informales conocidas como “pircas” con el objetivo de reducir y mitigar el riesgo en futuras construcciones o restringir su uso en ciertas aplicaciones.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo, se describen los métodos y teorías necesarias para la evaluación del riesgo sísmico: el análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA, por sus siglas en inglés) utilizado como metodología para la estimación de las intensidades sísmicas asociadas a niveles de sismo y el análisis de vulnerabilidad sísmica para determinar el daño asociado a un nivel de intensidad (PGA); asimismo, se describen los métodos de Mononobe Okabe y Saragoni para determinar la acción sísmica inducida sobre la pirca.

### 2.1 ANÁLISIS DE RIESGO SÍSMICO

El riesgo sísmico se define como la función de probabilidad de pérdidas derivadas de los daños a un elemento o conjunto de elementos como consecuencia de la acción de terremotos (López & Villacañas, 1999). Por lo tanto, el riesgo sísmico dependerá de dos agentes independientes y necesarios mutuamente: la estimación del peligro sísmico del emplazamiento y el cálculo de la vulnerabilidad sísmica en la estructura. Una forma práctica de entender el riesgo sísmico es representarla mediante la siguiente ecuación planteada por la UNESCO en 1980, la cual relaciona los puntos mencionados previamente (Muñoz, 1989):

$$R = V * P * M_t$$

Dónde: R representa el riesgo sísmico, V representa la vulnerabilidad de las construcciones, P representa el peligro o la amenaza sísmica y  $M_t$  representa el valor monetario de los bienes o valor expuesto de los elementos para la evaluación de riesgo. Asimismo, de manera gráfica en la Figura 7 se muestra todos los factores que intervienen para lograr la evaluación del riesgo sísmico, las cuales se describirán con mayor detalle en los siguientes incisos.

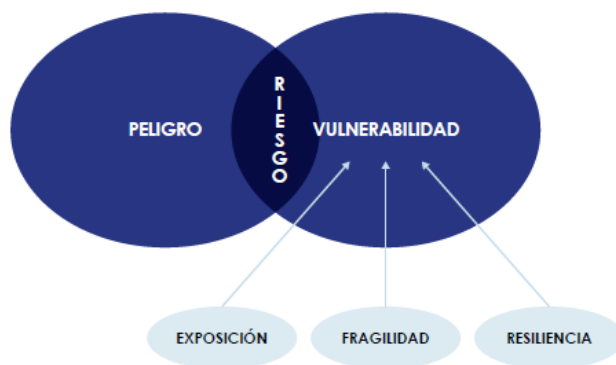


Figura 7. Factores que intervienen para la evaluación del riesgo sísmico. Fuente: CAN (2014)



### **2.1.1 Peligro sísmico**

El peligro sísmico es la probabilidad de que ocurra un sismo de determinada magnitud que genere, en un punto específico, un parámetro y/o medida de intensidad sísmica igual o mayor a un valor dado para un periodo de un tiempo determinado (Tavera et al., 2014). De acuerdo con Benito y Jiménez (1999) la evaluación de la peligro sísmico se clasifica en dos grandes grupos:

- Análisis determinístico, enfoque mediante el cual se estima el valor máximo que podría alcanzar un determinado parámetro sísmico, como por ejemplo la aceleración máxima del suelo (PGA, por sus siglas en inglés), velocidad máxima del suelo (PGV, por sus siglas en inglés), la intensidad, la magnitud entre otros. En ese sentido, este valor máximo identificado para expresar el peligro sísmico se determinará a través de registros obtenidos en la zona de estudio a partir de toda su historia sísmica (Muñoz, 2019). Además de ello este análisis no considera las incertidumbres en las magnitudes y ubicación del sismo.
- Análisis probabilístico, enfoque mediante el cual se considera todos los posibles eventos y/o escenarios que afecten la zona de análisis; asimismo, expresa el peligro sísmico como la probabilidad de que un parámetro sísmico sea igualado o superado durante un intervalo de tiempo.

En esta investigación el método utilizado para la estimación del peligro sísmico será el análisis probabilístico del peligro sísmico (PSHA), el cual se describe a continuación:

#### **2.1.1.1 Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico (PSHA):**

El PSHA está directamente relacionado con la evaluación de la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de intensidad fuerte en un emplazamiento determinado, el cual podría causar daños directos como la destrucción total o parcial de edificios e infraestructuras; asimismo, efectos indirectos como la interrupción de la economía y las actividades sociales, los cuales varían de acuerdo al grado de afectación (Atkinson & Goda, 2013). Entre los resultados del análisis probabilístico de peligro sísmico se tienen los siguientes: curvas de tasa de excedencia, mapas de isoaceleraciones y espectros de peligro uniforme. Este último representa al espectro que posee la misma probabilidad de ser excedida en un periodo dado en todo el rango de ordenadas espectrales (Tavera et al., 2014).

## **Procedimiento del análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA):**

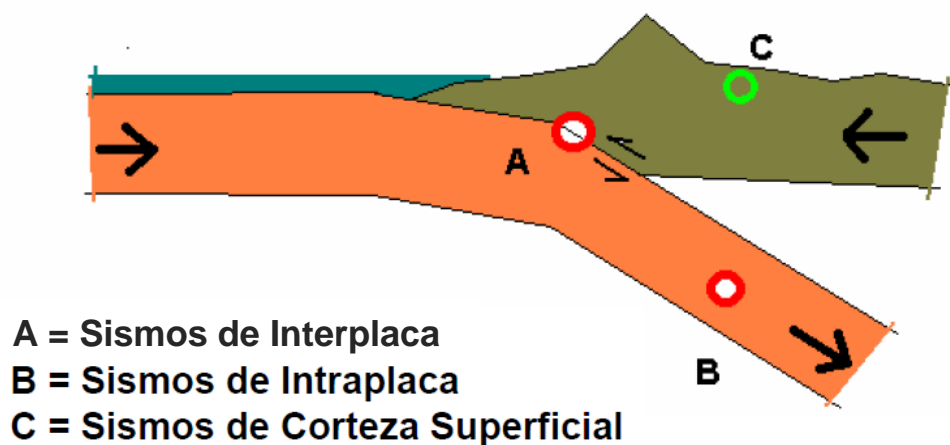
El procedimiento del PSHA fue establecido en la metodología propuesta por Esteva y Cornell (1968), la cual fue adoptada y utilizada por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en el 2014 para la re-evaluación del peligro sísmico en el Perú. El procedimiento seguido se presenta a continuación:

### **a. Identificación y caracterización de las fuentes sismogénicas**

Se entiende como fuente sismogénica aquella línea, área o volumen geográfico que presenta un potencial sísmico homogéneo en toda la fuente debido a similitudes geológicas, geofísicas y sísmicas; es decir, los procesos de generación y recurrencia de sismos es espacial y temporalmente homogéneo (Tavera et al., 2014).

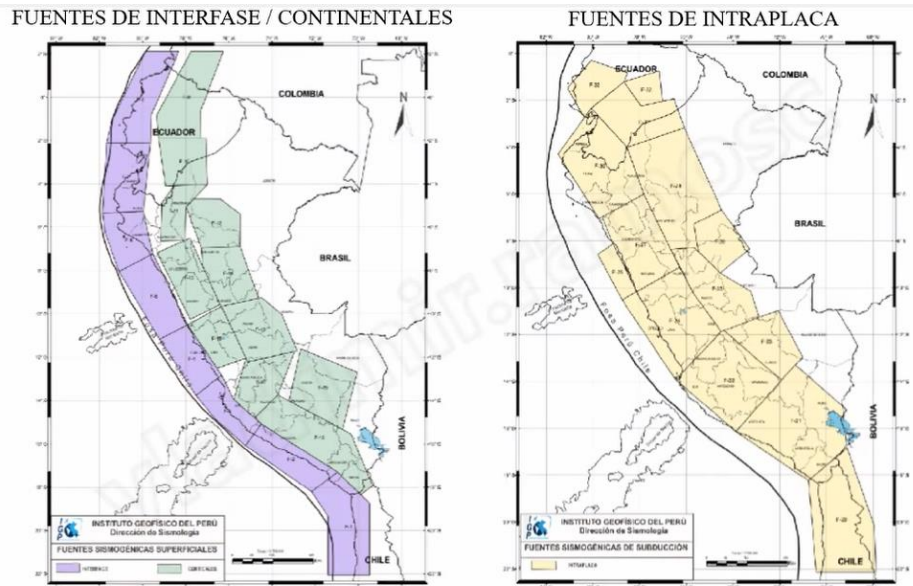
El IGP utilizó 33 fuentes sismogénicas para su modelo de análisis de peligro sísmico (Figura 9), en las cuales se consideraron la naturaleza de 2 tipos de sismos: sismos de subducción (interplaca e intraplaca) y sismos corticales (corteza superficial).

Las fuentes de subducción se generan por la interacción de la placa Sudamericana y la placa de Nazca mientras que las fuentes continentales o corticales se generan por la actividad superficial del territorio andino. Dentro de las fuentes de subducción, se producen los sismos de interplaca, los cuales ocurren en la superficie de contacto entre la placa oceánica de subducción y la placa continental; asimismo, se producen sismos de intraplaca, los cuales ocurren dentro de la placa oceánica que esta subductándose por debajo de la placa continental y pueden ser de profundidad intermedia y profunda tal como se muestra en la Figura 8.



*Figura 8. Sismos de subducción (interplaca e intraplaca) y sismos de corteza superficial.*

*Fuente: Alva (2020)*



33 FUENTES SISMOGÉNICAS REGIONALES: 9 fuentes de interfase, 13 fuentes de intraplaca, 11 fuentes

Figura 9. Fuentes sismogénicas definidas por el IGP. Fuente: IGP (2014)

### b. Caracterización de las sismicidad o distribución temporal de los sismos: análisis de recurrencia sísmica

Las sismicidad de una fuente sismogénica está determinada por dos parámetros: la frecuencia y la magnitud de los eventos. Esta relación puede ser expresada mediante una ecuación de recurrencia de magnitudes. En ese sentido, para este estudio y análisis se utilizará la ley de recurrencia de Gutenberg- Richter (1944) mostrada en la ecuación 1.

$$\text{Log}(N) = a - bM \dots (1)$$

Donde:

N = número de sismos de magnitud mayor o igual a M por unidad de tiempo

a, b = parámetros que dependen de la región y son constantes, determinados mediante una regresión no-lineal del catálogo de sismicidad local.

Posteriormente la ecuación de Gutenberg- Richter se truncó y limitó a una magnitud máxima ( $M_{m\acute{a}x}$ ), tal como se muestra en la Figura 10 y se planteó una nueva relación (ecuación 2).

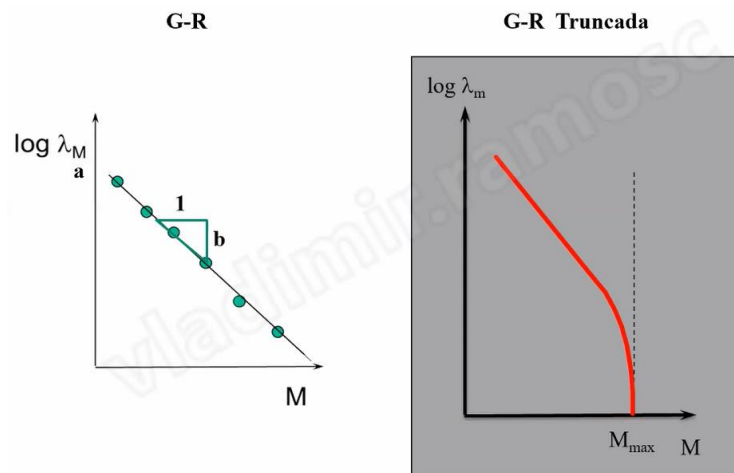


Figura 10. Ley de Gutenberg – Richter. Fuente: Alva (2020)

La ecuación de recurrencia sísmica modificada de Gutenberg y Richter se presenta a continuación:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \dots (2)$$

Donde:  $M_u$  representa la magnitud última,  $M_0$  la magnitud mínima,  $M$  la magnitud relevante y  $\beta = b * \ln 10$ . Asimismo, la magnitud relevante tendría que estar dentro del rango:  $M_0 < M < M_u$ .

**c. Definición de las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (GMPE, por sus siglas en inglés)**

Las GMPE son frecuentemente referidas como leyes de atenuación o modelos empíricos de movimientos del suelo; es decir, representan una función que relaciona las propiedades de un sismo y su relación espacial con un emplazamiento dado (Atkinson & Goda, 2013). El modelo del IGP utilizó 2 ecuaciones de predicción del movimiento del suelo, ecuaciones 3 y 4, propuestas por Youngs (1997) y Sadigh (1997) respectivamente. La ecuación 3 fue utilizada para sismos de subducción (interplaca e intraplaca) y la ecuación 4 para sismos corticales (continentales).

$$\ln(Sa) = C_1 + C_2M + C_3(10 - M)^3 + C_4 \ln(R + C_6 e^{C_7 M}) + C_5 H + C_7 Z_T \dots (3)$$

$$\ln(Sa) = C_1 + C_2M + C_3(8.5 - M)^{2.5} + C_4 \ln(R + e^{C_5 + C_6 M}) + C_7 \ln(R + 2) \dots (4)$$

Los parámetros requeridos en ambas GMPE son definidos a continuación: M es la magnitud del sismo, R es la distancia más corta a la zona de ruptura, Sa es la aceleración pseudoespectral y Ci representa los parámetros correspondientes a cada fuente y a un periodo estructural específico.

**d. Estimación de la probabilidad de excedencia del nivel de movimiento sísmico determinado en un periodo de tiempo dado**

El peligro sísmico se puede estimar a través la tasa de excedencia de cierto nivel de intensidad “a”,  $v(a)$ , la cual se representa de manera práctica en la ecuación 5. Con dicha expresión, se obtiene la cantidad total de eventos que superen o igualen el nivel de intensidad dado “a” en un periodo de un año.

$$v(a) = \sum_{Eventos} (A > a \text{ Evento}) \dots(5)$$

De este modo, un análisis probabilístico robusto requiere considerar la totalidad de posibles eventos que puedan ocurrir en una región determinada además del radio de ruptura. De acuerdo con Cornell (1968) se plantea la ecuación 6, la cual define matemáticamente la expresión previa. Donde:  $Pr(A > a|M, R_i|)$  representa la probabilidad de exceder cierto valor de intensidad, dada la magnitud M y el radio de ruptura  $R_i$ .

$$v(a) = \sum_{n=1}^N \int_{M_o}^{M_u} \frac{d\lambda(M)}{dM} Pr(A > a|M, R_i|) dM \dots(6)$$

Asimismo, se considera que la intensidad analizada presenta una distribución log-normal. En ese sentido, la probabilidad  $Pr(A > a|M, R_i|)$  será obtenida a través de la ecuación 7, en la cual  $\phi()$  representa la distribución normal estándar,  $E(\ln a|M, R_i|)$  es el valor esperado del logaritmo de la intensidad y  $\sigma_{\ln a}$  es la desviación estándar del logaritmo de la intensidad.

$$Pr(A > a|M, R_i|) = \phi\left(\frac{E(\ln a|M, R_i|) - \ln a}{\sigma_{\ln a}}\right) \dots(7)$$

Finalmente, el peligro sísmico será estimado en términos de la tasa de excedencia para valores de intensidad sísmica  $v(a)$ . Este procedimiento y formulación está incluido y sistematizado dentro del software Crisis 2007 desarrollado por Ordaz et al. (2007), el cual facilita el procedimiento de estimación del peligro sísmico en un emplazamiento o área definida.

### 2.1.1.2 Efectos topográficos

Los efectos topográficos son significativos cuando el tamaño de la irregularidad de la superficie es cercana al rango de la longitud de la onda incidente y a su vez la amplificación de las ondas sísmicas aumenta con la pendiente del talud o ladera (Suarez, 2006). De acuerdo con Ashford y Sitar (1997) la amplificación sísmica producida por la topografía de un talud puede normalizarse mediante una función de la relación entre la altura del talud y la longitud de onda, tal como se muestra en la Figura 11. A partir de esta gráfica se aprecia que para pendientes menores de 30° las amplificaciones no son muy significantes; empero para pendientes mayores se observa amplificaciones importantes que pueden llegar a factores de 1.6 en el peor de los casos.

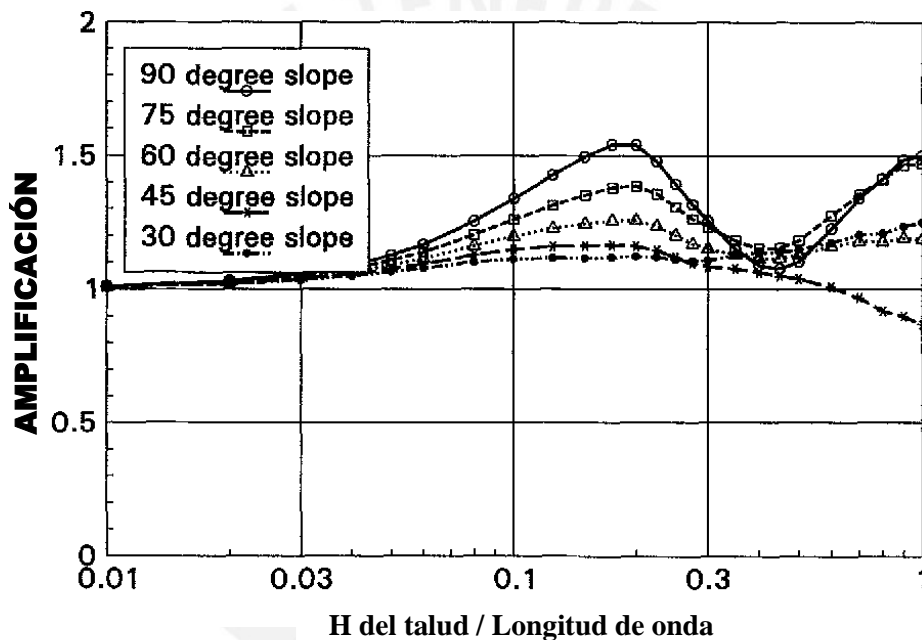


Figura 11. Amplificaciones de onda sísmica en un talud. Fuente: Ashford y Sitar (1997)

De la misma manera, Pagliaroli et al. (2007) proponen una expresión para determinar el factor de amplificación topográfica ( $S_T$ ) a partir del análisis y estudio numérico completo que considera los casos de dos acantilados en Italia (Figura 12 (a)). Asimismo, compara los resultados obtenidos con los factores recomendados por el Eurocódigo 8, el cual considera factores de amplificación constantes dependiendo del ángulo de inclinación del talud tal como se muestra en la Figura 12 (b). Por lo tanto, para obtener el factor de amplificación ( $S_T$ ) mediante la ecuación 8 es necesario establecer los siguientes datos de entrada: altura del talud (H) y distancia horizontal del pie del talud al punto de análisis (L).

$$S_T = 1 + 0.98 \left( \frac{H}{L} \right) \dots (8)$$

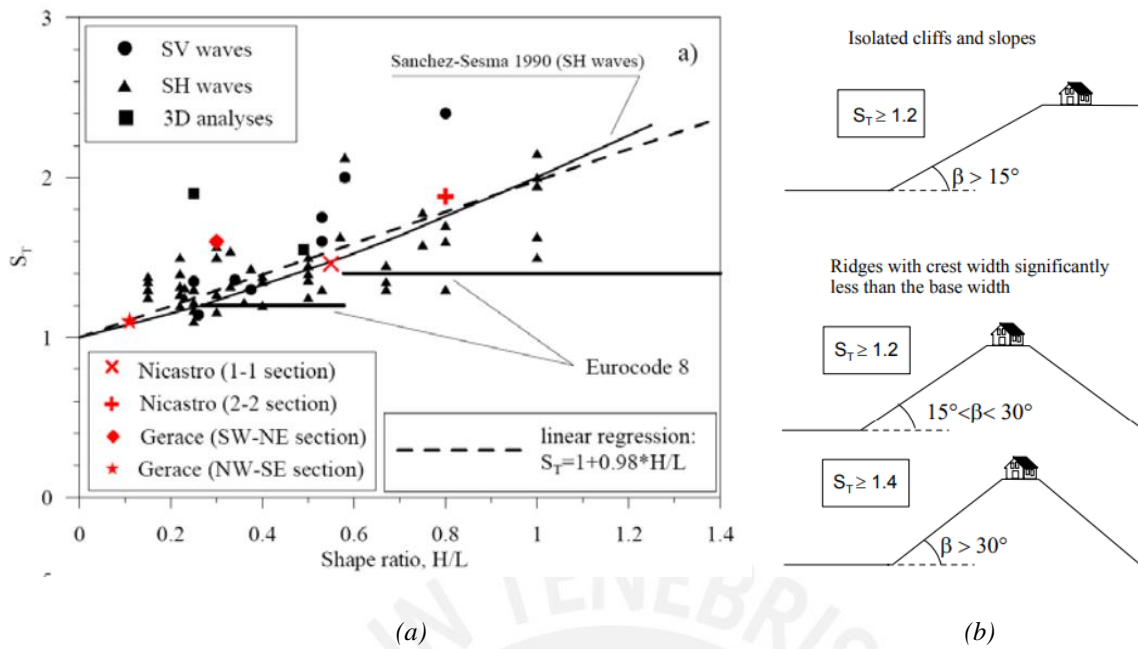


Figura 12. (a) Resultados obtenidos para factor de amplificación ( $S_T$ ) en cresta de talud por efecto topográfico, (b) Factores de amplificación topográfica recomendados por el Eurocódigo 8. Fuente: Pagliaroli et al., (2007)

En ese sentido, la influencia de la amplificación sísmica debido del efecto topográfico es un parámetro importante a considerar en la determinación de intensidades en el terreno. A modo de ejemplo, en la Figura 13 (b) se muestra el estado del conjunto habitacional Canal de Beagle cerca de Viña del Mar en Chile, donde luego del terremoto de 1985 se observó que los edificios de las partes altas de la colina sufrieron daños importantes, mientras que aquellos en las partes bajas tuvieron poco o ningún daño.

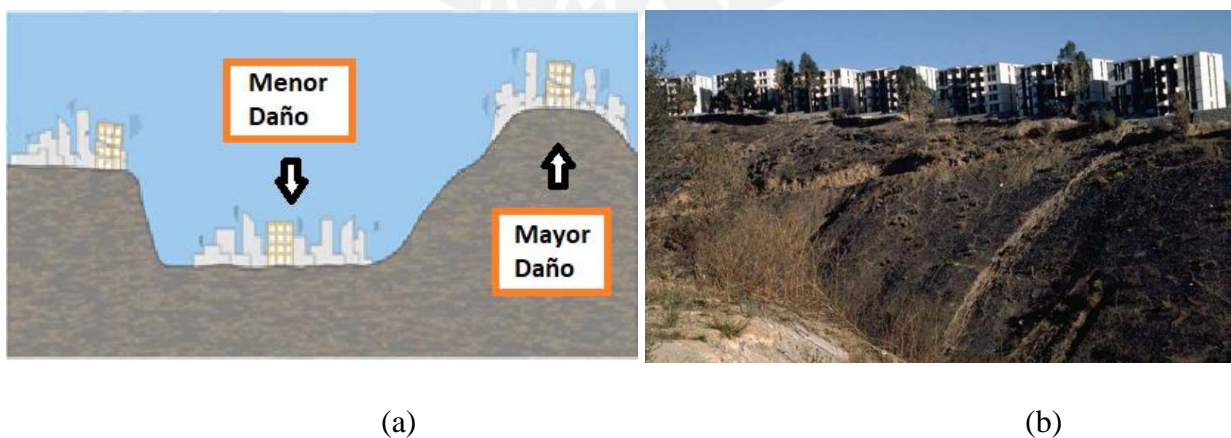


Figura 13. (a) Esquema gráfico de amplificación topográfica, (b) Conjunto Habitacional Canal de Beagle en Terremoto 1985, Chile. Fuente: Muñoz (2019)

### 2.1.2 Vulnerabilidad sísmica

La vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de la estructura, una característica de su comportamiento ante la acción de un sismo descrito a través de una ley causa-efecto, en la cual la causa es el sismo y el efecto el daño (Sandi, 1986). En ese sentido, los estudios de vulnerabilidad sísmica se basan en la comparación de la capacidad resistente de la edificación con la demanda debido a la acción sísmica; asimismo, su caracterización depende de ambos elementos.

En la actualidad, existe una gran cantidad de métodos de análisis de vulnerabilidad desarrollados a lo largo del tiempo a través de la experiencia y el avance de nuevos modelos numéricos. De acuerdo con Yasmin et al. (2015), los métodos de análisis de vulnerabilidad sísmica se clasifican en 3 grupos: métodos empíricos, métodos analíticos y métodos híbridos.

- **Métodos empíricos:**

Utilizan la información de daños observados luego de un evento sísmico, estos datos se basan en la opinión de múltiples expertos y profesionales del campo. Los 2 principales tipos de formulación de métodos empíricos son las matrices de probabilidad de daño (DPM, por sus siglas en inglés) y funciones de vulnerabilidad (Yasmin et al., 2015).

- **Métodos analíticos:**

Estos métodos utilizan análisis numéricos y pueden ser empleados en zonas donde no se dispone de observaciones de daños debido a sismos, ni de suficientes resultados de ensayos de laboratorio. También pueden ser útiles para el análisis de la vulnerabilidad sísmica de una estructura en particular, como por ejemplo, el caso de estructuras esenciales (Bonett, 2003).

- **Métodos híbridos:**

El método híbrido emplea las ventajas de ambos métodos mencionados. En este método las estadísticas del daño post-terremoto es combinado con las estadísticas del daño simulado de un modelo matemático de la estructura en consideración (Yasmin et al., 2015).



Del mismo modo, de acuerdo con el Manual para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales realizado por el CENEPRED (2015), la vulnerabilidad comprende tres conceptos fundamentales: exposición, resiliencia y fragilidad. En primer lugar, la exposición está referida a las decisiones y prácticas que ubican al ser humano y sus medios de vida en la zona de impacto de un peligro. En segundo lugar, la resiliencia está referida al nivel de asimilación o capacidad de recuperación del ser humano y sus medios de vida frente a la ocurrencia de un peligro. Finalmente, la fragilidad está referida a las condiciones de desventaja o debilidad relativa del ser humano y sus medios de vida frente a un peligro; por lo tanto, la fragilidad de una estructura está relacionada con su vulnerabilidad sísmica y puede ser representada mediante curvas o funciones de fragilidad (Moreno y Bairán, 2010).

#### **2.1.2.1 Funciones de fragilidad**

Las curvas de fragilidad 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 (FEMA, 1999). En otras palabras las curvas de fragilidad relacionan la probabilidad de alcanzar un estado de daño específico ante cierto parámetro de acción sísmica, como por ejemplo, la aceleración máxima del terreno (PGA).

En ese sentido, la construcción de estas curvas de fragilidad requiere de un entendimiento completo de los mecanismos de respuesta del sistema estructural para diferentes niveles de demanda sísmica, los cuales varían entre movimientos frecuentes de baja intensidad hasta movimientos fuertes poco frecuentes (Bonett, 2003). Asimismo, a partir de estas curvas de fragilidad se pueden construir las funciones de daño esperado, útiles para realizar la evaluación del riesgo sísmico en estructuras civiles como viviendas, colegios, hospitales entre otros.

#### **2.1.2.2 Funciones de daño esperado**

La función de daño esperado es una expresión matemática que permite relacionar el daño estructural generado con respecto a un parámetro de intensidad determinado, aceleración máxima del terreno (PGA), velocidad máxima del terreno (PGV) y desplazamiento máximo del terreno (PGD) entre los más comunes. En la Figura 14 se observa curvas de vulnerabilidad para 3 sistemas de vivienda-pirca (pircas de 1m, 1.5m y 2m de altura)

obtenidas a partir de modelación numérica mediante el programa computacional 3DEC v.4.2, el cual utiliza el Método de Elementos Discretos (MED) en su análisis. El procedimiento consistió en la aplicación de cargas en servicio y de sismo mediante simulaciones pseudo-estáticas en tres modelos construidos con el software, las cuales ocasionaron derivas fuera del plano asociadas a un PGA determinado en cada una de las pircas modeladas (Zanelli, 2019). En este análisis se consideró tres estados de daño estructural: extensivo, moderado y leve, los cuales fueron asociados con las derivas obtenidas previamente.

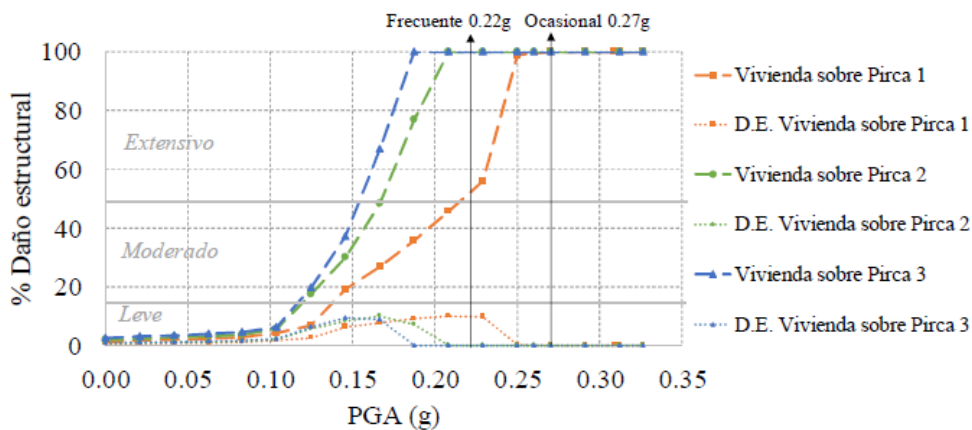


Figura 14. Curvas de vulnerabilidad para viviendas sobre pircas. Fuente: Zanelli (2019)

A partir de la Figura 14 se observa que para un PGA de 0.15g las 3 viviendas tendrán un estado de daño moderado. No obstante, la vivienda sobre Pirca 3 (pirca de 2m de altura) presentará un mayor daño estructural, alrededor del 40%, en comparación con las otras viviendas, las cuales presentarán daños estructurales del 35% y 20% para las viviendas sobre Pirca 2 (pirca de 1.5m de altura) y Pirca 1 (pirca de 1m de altura) respectivamente.

## 2.2 ANÁLISIS PSEUDOESTÁTICO

La estabilidad sísmica de estructuras de contención, como son las presas de tierra y muros de gravedad, han sido analizadas usando un análisis pseudoestático, en el cual los efectos de un sismo son representados por aceleraciones horizontales y/o verticales (Martínez et al., 2011). En esa misma línea, los efectos de vibración del sismo son representados mediante fuerzas inerciales  $F_h$  y  $F_v$ , las cuales actúan a través del centroide de la masa de suelo deslizante. Estas fuerzas pseudoestáticas pueden ser estimadas según las ecuaciones 9 y 10 propuestas por Kramer (1996).

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W \dots(9)$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \dots(10)$$

Donde  $a_h$  y  $a_v$  son las aceleraciones horizontales y verticales,  $k_h$  y  $k_v$  son coeficientes pseudoestáticos horizontales y verticales adimensionales (coeficientes sísmicos), y  $W$  es el peso de la masa de suelo deslizante (falla).

De la misma manera, el Método de Equilibrio Límite (MEL) se asocia a la estimación de un coeficiente sísmico que represente de manera adecuada el comportamiento real de una estructura frente a un evento sísmico, usualmente se ha utilizado una fracción constante del PGA. Para diseño generalmente se aplican valores entre 0.33 y 0.67, los cuales dependen de la zona sísmica y la ubicación del proyecto.

### 2.2.1 Método de Saragoni

Saragoni en 1993 propone la ecuación 11, la cual permite estimar el coeficiente sísmico horizontal ( $k_h$ ) mediante la aceleración horizontal máxima del terreno (PGA) representada por  $a_{max}$ . Esta expresión fue desarrollada de acuerdo con la experiencia Chilena de muros de gravedad en muelles y se basó en el artículo de Noda y Uwave (1976). Asimismo, es normalmente aplicada cuando existe un estudio de peligro sísmico disponible para determinar apropiadamente  $a_{max}$ .

$$k_h = \left\{ 0.3 * \frac{a_{max}}{g}; a_{max} \leq 0.67g \right\} \text{ o } \left\{ 0.22 * \left( \frac{a_{max}}{g} \right)^{1/3}; a_{max} > 0.67g \right\} \dots(11)$$

### 2.2.2 Método de Mononobe Okabe

El método de Mononobe – Okabe es una extensión de la teoría de Coulomb (1776), el cual es utilizado para el cálculo de la fuerza sísmica inducida sobre un muro de contención. Este método simplifica la interacción suelo estructura en un evento sísmico; sin embargo, su uso es muy extendido en el diseño en muros de contención.

Este modelo supone ciertas consideraciones para su aplicación, entre ellas que el relleno tiene que ser seco, granular y homogéneo y además que el muro de contención es lo suficientemente largo para despreciar los efectos de borde; asimismo, tiene un carácter pseudoestático debido a que añade a las fuerzas de empuje en situación estática, las

fuerzas inerciales y sobre empujes producidos por el sismo (Suarez, 2006). La fuerza total incluyendo presión estática y dinámica se determina mediante la ecuación 12.

$$P_{ae} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - K_v) K_{ae} \dots (12)$$

Donde:

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos \Psi \cos^2 \theta (\delta + \theta + \Psi) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi - \beta - \Psi)}{\cos(\delta + \theta + \Psi) \cos(\beta - \theta)}} \right]} \dots (13)$$

$$\Psi = \text{Tan}^{-1} [K_h / (1 - K_v)] \dots (14)$$

En la ecuación 14 los factores  $k_h$  y  $k_v$  representa los coeficiente sísmicos horizontal y vertical respectivamente, donde generalmente el valor de  $k_v$  es la mitad del coeficiente sísmico horizontal  $k_h$ . Asimismo, el valor de  $K_{ae}$  incluye la suma de los efectos estático y dinámico; en consecuencia, para obtener el valor de fuerza ocasionada únicamente por el sismo será necesario quitar el efecto estático proporcionado en la ecuación 12.

En la Figura 15 se muestra la nomenclatura utilizada para un muro de contención, el cual servirá de referencia para el análisis realizado con las pircas. Asimismo, para el presente caso de estudio, las pircas no presentarán inclinación en las caras del muro y el ángulo de inclinación del relleno es  $\beta = 0^\circ$ .

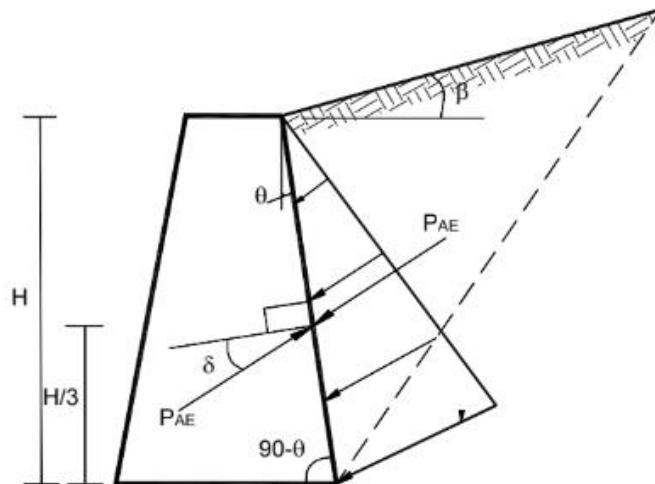


Figura 15. Nomenclatura para la utilización del método de Mononobe Okabe. Fuente: Suarez (2006)

### CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación presenta un enfoque cuantitativo debido a que utiliza la recolección de datos de los factores de riesgo, entre ellos, peligro, vulnerabilidad y exposición; para lograr determinar el riesgo sísmico en la zona de estudio a través de la medición numérica y el análisis estadístico. Asimismo, el alcance de la investigación es del tipo descriptivo porque intenta dimensionar y caracterizar la problemática del riesgo sísmico mediante la medición y el recojo de información independiente de cada uno de los factores de riesgo.

En el presente capítulo se muestra la metodología seguida para la evaluación del riesgo sísmico en el Asentamiento Humano Edén del Manantial para lo cual se realizará una breve descripción de cada una de las etapas previas (caracterización y ensayos estáticos) y factores de riesgo (peligro, vulnerabilidad y exposición). En primer lugar, se documentará y caracterizará el proceso constructivo y los ensayos estáticos de las 6 pircas a escala natural mediante un registro fotográfico y audiovisual. En segundo lugar, se estimará el peligro sísmico de la zona de estudio mediante el método *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) utilizando el software CRISIS 2007 V.7.6, con el cual se encontrará las intensidades sísmicas asociadas a distintos periodos de retorno; asimismo, se considerará la amplificación de la intensidad debido a los efectos topográficos mediante el software Efectos de Sitio V.1.0. En tercer lugar, se determinará la vulnerabilidad sísmica a través de la recopilación y el análisis de estudios previos, tanto numéricos como experimentales, con los cuales se obtendrá funciones de daño esperado de pircas y viviendas características que relacionarán la máxima aceleración del terreno con el daño estructural generado por el evento sísmico. Finalmente, se evaluará el riesgo sísmico de la zona de estudio mediante dos enfoques: un análisis probabilístico de escenarios y un análisis por escenario sísmico, ambos con el objetivo de estimar a través de indicadores las pérdidas probables en el sistema en estudio, para este proceso se utilizará el software CAPRAGIS V.2.4.0.

De manera gráfica, en la Figura 16 se muestra el diagrama de flujo con la secuencia de procedimientos que seguirá la presente investigación.

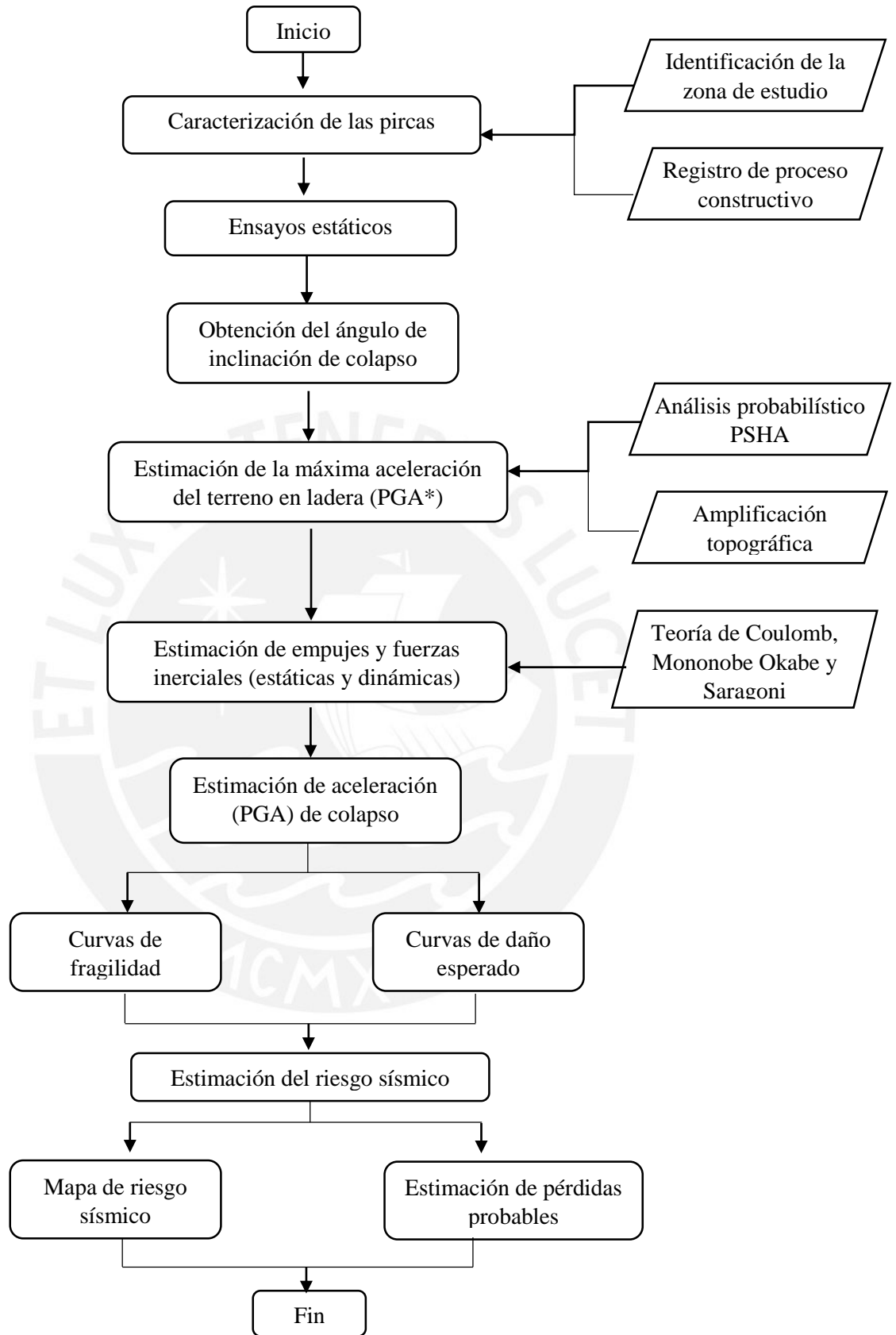


Figura 16. Diagrama de flujo de la metodología

### 3.1 CASO DE ESTUDIO

Se tomó como área de estudio el Asentamiento Humano Edén del Manantial ubicado en el distrito de Villa María del Triunfo, provincia de Lima cuyo mapa urbano se muestra en la Figura 17. El asentamiento humano Edén del Manantial es un barrio formado a inicios del año 2000; asimismo, es el último y más lejano barrio ubicado en la parte más alta de la quebrada de Paraíso, en el sector José Carlos Mariátegui (García et al., 2014).

De acuerdo con el informe de inspección de la seguridad física realizado por el INGEMMET (2005) en la zona existe una gran cantidad de viviendas informales, las cuales se encuentran sobre terrazas constituidas por rellenos no controlados sostenidos por pircas; asimismo, estos sistemas se encuentran sobre una topografía agreste conformada por laderas de pendientes considerables de alrededor de 25° a 40°.

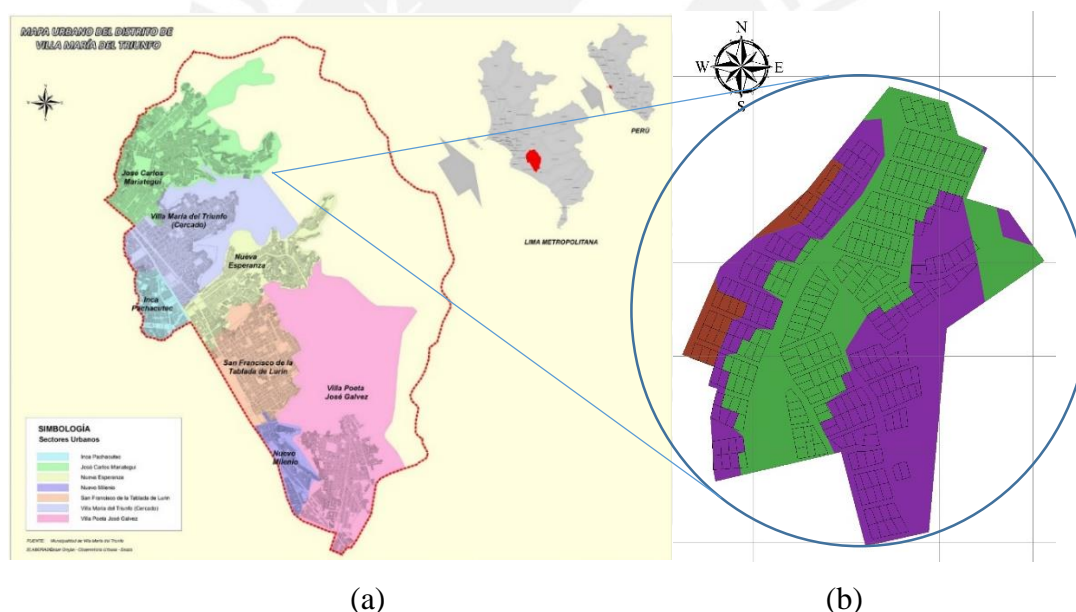


Figura 17. (a) Mapa urbano Villa María del Triunfo. Fuente: MVMT (2016), (b) Asentamiento Humano Edén del Manantial. Fuente: COFOPRI (2007)

Debido a la condición agreste del terreno, el AAHH Edén del Manantial está expuesto a diversos peligros físicos como caída de rocas, deslizamientos y eventos sísmicos, lo cual evidencia el alto riesgo que presenta la población ante la ocurrencia de algún evento natural como sismos o huaycos. En la Figura 18 se muestra una imagen satelital del asentamiento humano en estudio, en la cual se aprecia la topografía agreste de las quebradas alrededor del lugar de estudio.



Figura 18. Ubicación del Asentamiento Humano Edén del manantial. Fuente: Geollaqta

### 3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS PIRCAS REPRESENTATIVAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para la caracterización de las pircas representativas del distrito de Villa María del Triunfo se tomará en cuenta la información obtenida dentro del proyecto N° 109-2017 - FONDECYT “Validación de técnicas de construcción de pircas mediante estudios numérico-experimentales con tecnología desarrollada en Perú” y los datos estadísticos de la tesis de maestría realizada por Zanelli (2019). De acuerdo con los resultados de ambas investigaciones se estimó la altura de 3 pircas representativas de cierta zona de estudio, estas fueron de 1m, 1.5m y 2m cuyas dimensiones se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Dimensiones de pircas típicas

	Altura (m)	Ancho mayor (m)	Ancho menor (m)	Longitud (m)
<b>Pirca 1</b>	1.00	0.45	0.25	4.00
<b>Pirca 2</b>	1.50	0.60	0.30	6.00
<b>Pirca 3</b>	2.00	0.70	0.35	8.00

Fuente: Zanelli (2019)

Sin embargo, para los ensayos realizados a escala natural estudiados en esta investigación se emplearon pircas de altura 1m y 1.5m debido a que son las alturas que presentaron mayor frecuencia en la zona de estudio; asimismo, de acuerdo con la guía local propuesta



por la Municipalidad Metropolitana de Lima (2013) se recomienda una altura máxima de 1m en pircas para garantizar cierto grado de estabilidad y seguridad.

A partir de esta información, el proyecto N° 109-2017 - FONDECYT financió la construcción de 6 pircas a escala natural (3 de ellas de 1m de altura y las otras 3 de 1.5m de altura) a cargo de 2 maestros pirqueros, Macario Vilmer Pascual Mata con DNI N° 22726548 y Andres Chavez Mejía con DNI N° 27546621, ambos con una gran experiencia de más de 8 años en la construcción de estas estructuras en la zona de Villa María del Triunfo. Estos maestros fueron contactados gracias a la organización sin fines de lucro MED – LIFE. A modo de ejemplo, en la Figura 19 se puede observar una pirca en Villa María del Triunfo construida por los maestros pirqueros partícipes del proyecto.



*Figura 19. Pircas de la zona de Villa María del Triunfo. Fuente: Archivo personal Santa Cruz (2019)*

### **3.2.1 Descripción de las pircas de ensayo**

El área donde se realizó la construcción de las pircas fue sobre el equipo de mesa inclinable para ensayos estáticos ubicada en el laboratorio de estructuras de la Universidad San Ignacio de Loyola (USIL) sede Pachacamac, el cual se muestra en la Figura 20. El proyecto contó con el apoyo de 2 tesis de pregrado, los cuales se encargaron de reportar y registrar de manera detallada todo el proceso constructivo de dichos muros para su respectivo análisis posterior mediante la generación de informes y videos informativos.



Figura 20. Área de construcción y ensayo.

Asimismo, el proyecto N° 109-2017-FONDECYT estaba a cargo de la Dra. Sandra Santa Cruz quién se encargó de la supervisión y logística de todo proceso en general. Además, es importante mencionar que se solicitó a los maestros pirqueros un consentimiento informado, el cual permitía que los participantes del proyecto puedan grabar, tomar fotos y realizar entrevistas a lo largo de todo el proceso de construcción de las pircas para uso exclusivo con fines de investigación académica.

Para la presente investigación los especímenes fueron clasificados teniendo en cuenta sus dimensiones en 2 tipos tal como se muestra en la Tabla 2. Esta clasificación en 2 tipologías servirá para la distinción en el análisis posterior de vulnerabilidad sísmica.

Tabla 2.

Dimensiones de las pircas ensayadas

MURO	Altura (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	Cantidad de especímenes
<b>MURO TIPO 1</b>	1 m	0.5 m	4 m	3
<b>MURO TIPO 2</b>	1.5 m	0.6 m	4 m	3

### 3.2.2 Proceso constructivo

En todo el proceso de construcción de los 6 especímenes se reportó y recopiló toda la información necesaria, entre ellas el rendimiento de construcción, materiales requeridos, herramientas utilizadas y técnica empleada. Asimismo, se realizaron entrevistas a los maestros pirqueros con la finalidad de conocer a mayor profundidad las técnicas y criterios empleados en la construcción de pircas.

Prueba de ello se presentará el proceso general por etapas de una pirca convencional y se comentará acerca de las similitudes y diferencias con la metodología de construcción de muros de piedra con junta seca presentada en el libro McCombie et al. (2015).

### 3.2.3 Evaluación experimental de las pircas

El objetivo general de la construcción de los 6 especímenes fue conocer y evaluar su comportamiento experimental a escala natural frente a cargas laterales estáticas perpendiculares a su plano, estas fuerzas generadas por el propio peso del muro. En la Figura 21 (b) se observa la representación de una pirca ensayada en la mesa inclinable para ensayos estáticos mediante su diagrama de cuerpo libre (DCL), en el cual se distinguen las fuerzas y reacciones presentes en la pirca. Es importante mencionar que el presente modelo considera al muro de piedra como si fuera un bloque rígido; en consecuencia, las componentes horizontal y vertical estarán determinados por el peso de la pirca ( $W$ ) y el ángulo de inclinación de la plataforma ( $B$ ).

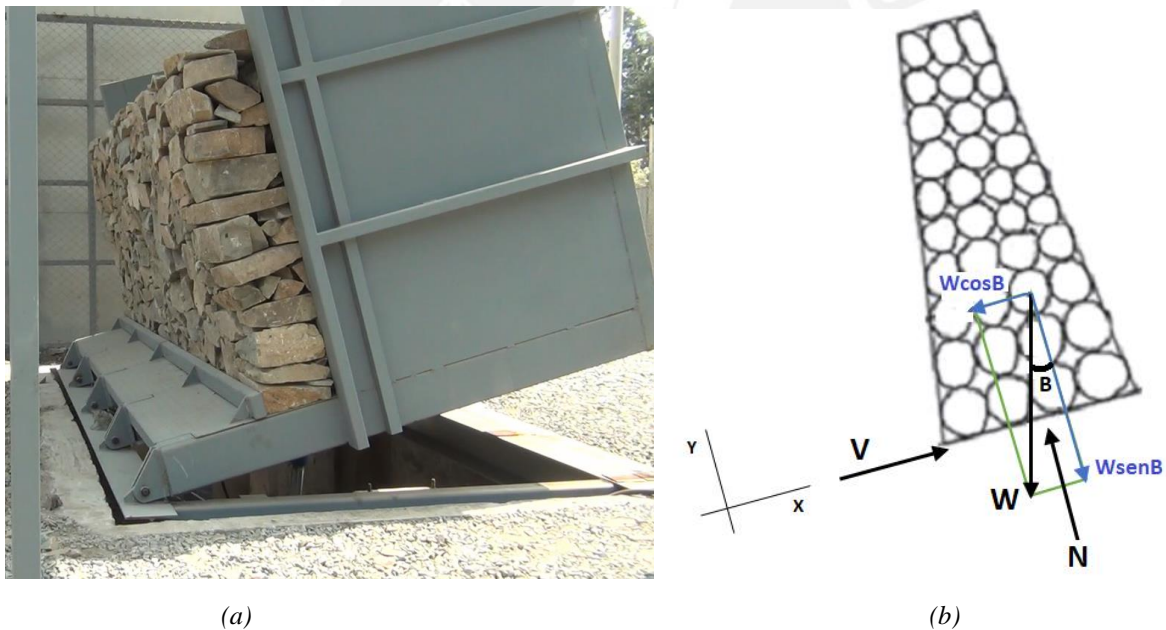


Figura 21. (a) Mesa inclinable para ensayos estáticos. Fuente: Proyecto N° 2017-109-FONDECYT  
(b) Modelo de DCL para pirca. Adaptado de Rivas (2019).

Enseguida, se ensayaron los 6 especímenes en la mesa inclinable tal como se muestra en la Figura 22. Esta evaluación consistió en el aumento continuo del ángulo de inclinación de la plataforma hasta lograr que la pirca colapse, para este proceso se adoptó ciertos rangos de incremento angular que fueron determinados a través de la experiencia de los primeros ensayos para cada tipo de muro. En ese sentido, los resultados finales de esta



experimentación fueron la carga horizontal y ángulo de colapso además de las deformaciones y/o derivas producidas en cada etapa de ensayo.



*Figura 22. Mesa inclinable para ensayos estáticos, Campus USIL*

### **3.3 ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE MOVIMIENTO**

#### **3.3.1 Aceleración máxima del terreno (PGA, por sus siglas en inglés)**

El PGA es determinado mediante un estudio de peligro sísmico, el cual utiliza el método de análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA) para su estimación. Este estudio se realizará mediante el uso del software CRISIS 2007, el cual seguirá el procedimiento del PSHA mostrado en el capítulo previo y tomará como modelo el informe de re-evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú realizado por el IGP (2014).

En dicho documento se definen 2 tipos de sismos: sismos de subducción (intraplaca e interplaca) y sismos corticales (continentales). Asimismo, considera 33 fuentes sismogénicas con parámetros sismológicos específicos para cada una de estas. Por otro lado, el PGA obtenido será asociado a un periodo de retorno determinado, el cual representa el número de años en promedio para que ocurra un evento de intensidad y características similares. De acuerdo con el SEAOC Comité Visión 2000 se considerarán 4 sismos de diseño asociados a un periodo de retorno particular, los cuales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.

Sismos de diseño, propuestos por el SEAOC Visión 2000

<b>Sismo de diseño</b>	<b>Periodo de retorno (años)</b>	<b>Probabilidad de excedencia en 50 años (%)</b>
<b>Frecuente</b>	45	69
<b>Ocasional</b>	75	50
<b>Raro</b>	475	10
<b>Muy raro</b>	970	5

Fuente: SEAOC Visión (2000)

A modo de ejemplo, en la Tabla 3 se observa que un sismo frecuente está asociado a un periodo de retorno de 45 años con una probabilidad de excedencia del 69%; mientras que un sismo ocasional se asocia a un periodo de retorno de 75 años. En ese sentido, para esta investigación se determinará la intensidad ocasionada por un sismo frecuente en la zona de estudio y se verificará los daños producidos en los sistemas vivienda-pirca de 1m y 1.5m de altura; asimismo, se estimará el peligro sísmico asociado a los 4 sismos de diseño, los cuales se compararán posteriormente con los valores obtenidos en la plataforma en línea proporcionada por SENCICO.

De la misma manera, estudios más extensos sugieren aceleraciones máximas del terreno (PGA) en la costa oeste de América del Sur asociadas a los 4 sismos de diseño, las cuales se presentan en la Tabla 4. Estos valores estimados servirán para contrastar y verificar el estudio de peligro sísmico realizado.

Tabla 4.

Aceleraciones estimadas para la costa oeste de América del Sur

<b>Sismo de diseño</b>	<b>Aceleración esperada para la costa oeste de América del Sur (g)</b>
<b>Frecuente</b>	0.2
<b>Ocasional</b>	0.25
<b>Raro</b>	0.4
<b>Muy raro</b>	0.5

Fuente: Muñoz (2019)

### 3.3.2 Aceleración máxima del terreno en ladera (PGA\*)

Los resultados obtenidos en el estudio de peligro sísmico (PGA) representan la intensidad producida a nivel de basamento rocoso y/o suelo firme. Sin embargo, estos valores pueden ser amplificados por las condiciones de sitio, efectos de suelo y/o efectos de topografía, para este caso debido a que la zona de laderas está constituido principalmente por roca se

ignora los efectos del suelo; pero si se tomará en cuenta la amplificación por efectos de topografía debido a la zona agreste y las pendientes considerables del terreno.

En ese sentido, se obtendrán factores de amplificación topográfica a partir de estudios experimentales previos, estos factores dependerán de la pendiente y la altura de la ladera. Para el cálculo de la pendiente promedio en las laderas ubicadas en la zona de estudio se hará uso del software Google Earth Pro; asimismo, se empleará el programa Efectos De Sitio desarrollado por Gabriel Bernal para introducir los factores de amplificación determinadas en cada zona de ladera. Por lo tanto, de manera práctica la máxima aceleración del terreno en ladera ( $PGA^*$ ) será calculada como el producto del PGA obtenido en la zona de análisis multiplicado por el factor de amplificación topográfico ( $S_T$ ) obtenido de la expresión de Pagliaroli et al. (2007) tal como se muestra en la ecuación 14.

$$PGA^* = PGA * S_T \dots(14)$$

### **3.4 CÁLCULO DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LAS PIRCAS**

Esta investigación y análisis toma como consideración inicial que la vulnerabilidad del sistema vivienda-pirca depende principalmente de la pirca debido a que la falla de este elemento ocasionaría el colapso total de todo el sistema. Asimismo, las viviendas en la mayoría de los casos son estructuras informales compuestas por materiales no tecnificados, tales como madera, calaminas, esteras entre otros; en consecuencia, los daños generados en estas estructuras serán poco significativos y complicados de estimar.

En ese sentido, luego de procesar los resultados experimentales en cada una de las 6 pircas ensayadas se construirá curvas de capacidad para cada tipología con el objetivo de verificar el comportamiento de estos muros ante la aplicación de fuerzas horizontales ocasionadas por su propio peso. Enseguida, se obtendrán curvas de vulnerabilidad de las pircas a partir de los ensayos realizados de manera experimental y serán contrastados con la investigación realizada por Zanelli (2019); asimismo, las funciones de daño esperado de los sistemas estructurales analizados en esta evaluación de riesgo sísmico serán obtenidos de los Informes Técnicos de Evaluación de Riesgos Naturales en América Central (Central America Probabilistic Risk Assessment (CAPRA), 2010).

En el primer estudio Zanelli (2019) se generó 3 curvas de vulnerabilidad para pircas de 1m, 1.5m y 2m de altura tal como se muestra en la Figura 23, estas curvas fueron obtenidas de manera analítica mediante modelos numéricos de elementos discretos para lo cual se utilizó 3 estados de daño: extensivo, moderado y leve .

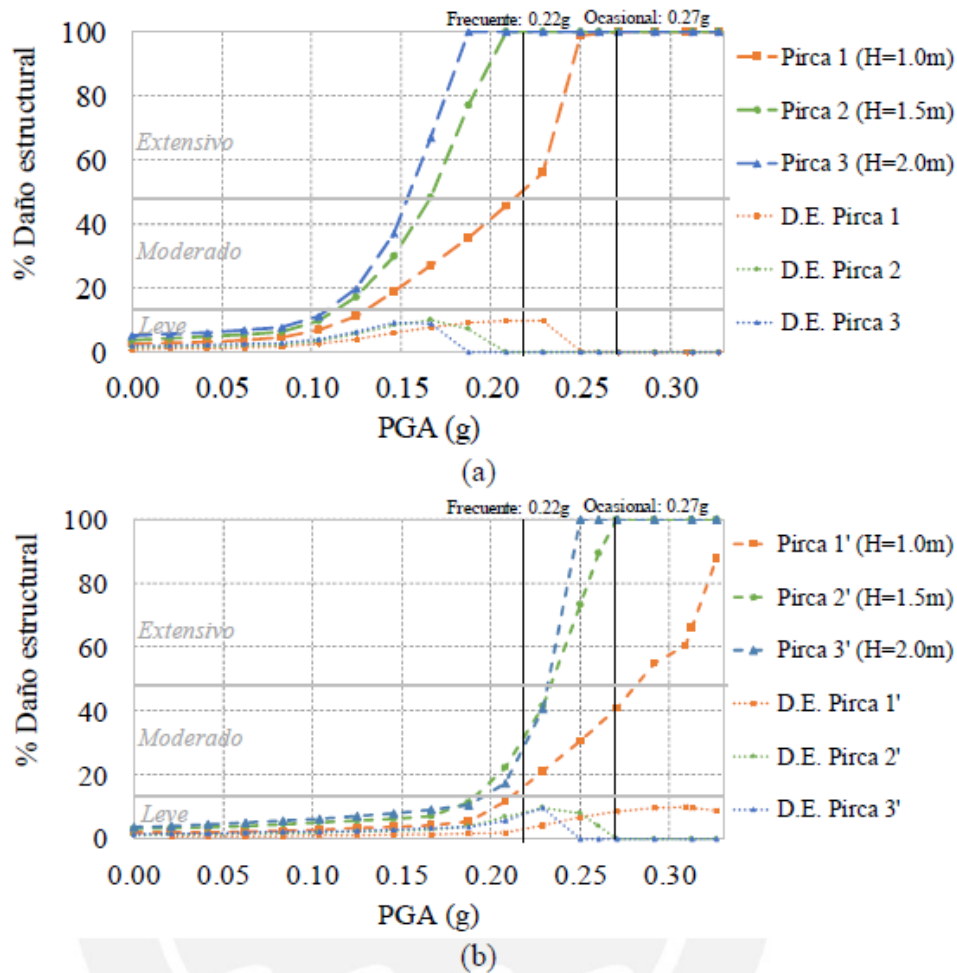





Figura 23. Curvas de vulnerabilidad sísmica de pircas características, (a) Considerando relleno en toda la altura y (b) Considerando relleno a la mitad de la altura. Fuente: Zanelli (2019)

A partir de la Figura 23 se puede observar que la vulnerabilidad de las pircas aumenta significativamente con la altura siendo los casos más críticos las pircas de 1.5m y 2m, las cuales ante un sismo ocasional ya estarían en un estado de daño extensivo o colapso.

Del mismo modo, los informes técnicos de Evaluación de Riesgos Naturales realizados en Centro América reportaron una gran cantidad de sistemas estructurales para su análisis de vulnerabilidad, a partir de esta información se definieron e identificaron 3 tipos de viviendas con características similares a las encontradas en el AAHH Edén del Manantial en el distrito de Villa María del Triunfo: sistema estructural de madera, mampostería simple y no tecnificado. Es importante resaltar dentro de estos el sistema no tecnificado,

el cual está constituido por viviendas construidas de manera informal con materiales precarios como esteras, calaminas e incluso materiales desechables. En la Tabla 5 se muestra la descripción de cada uno de los sistemas estructurales definidos acompañados de una fotografía referencial.

Tabla 5.  
Clasificación de sistemas estructurales

	<b>Descripción del sistema estructural de vivienda</b>	<b>Foto vivienda sobre pirca referencial</b>
<b>MADERA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sistema estructural principal de madera.</li> <li>-Vigas y columnas de madera.</li> <li>-Falso piso o piso de madera</li> <li>-Cubierta del techo ligera: láminas de zinc (calamina)</li> <li>-Paredes de madera u otro material</li> <li>-Viviendas de un piso</li> <li>-Vulnerabilidad sísmica baja</li> </ul>	
<b>MAMPOSTERÍA SIMPLE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sistema estructural principal de muros de ladrillo</li> <li>-Vigas de madera o metal</li> <li>-Falso piso o piso de madera</li> <li>-Cubierta de techo ligera: láminas de zinc (calaminas)</li> <li>-Paredes interiores de madera u otro material</li> <li>-Viviendas de uno o dos pisos</li> <li>-Vulnerabilidad sísmica alta</li> </ul>	
<b>NO TECNIFICADO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sistema estructural indefinido</li> <li>-Estructura de cualquier tipo de material de desecho</li> <li>-Viviendas de un piso</li> <li>-Vulnerabilidad sísmica impredecible</li> </ul>	

Nota: Adaptado de Zanelli (2019)

Por lo tanto, la evaluación del riesgo sísmico propuesta para el caso de estudio utilizará estos 3 sistemas estructurales mostrados en la tabla previa, los cuales a su vez fueron contrastados y caracterizados con la información georeferenciada de los Censos Nacionales del 2017. Es importante mencionar que la identificación y clasificación de



estos 3 sistemas estructurales tomó como referencia el tipo de material predominante de las paredes presente en la vivienda.

### **3.5 EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO**

El riesgo sísmico es la cuantificación del daño que genera un evento sísmico a un sistema o estructura, para volver a su estado natural sin daños (reparación). De la misma manera, su evaluación también podría manifestarse mediante la cuantificación de las pérdidas económicas para cierto escenario sísmico (Santa Cruz, 2013). En ese sentido, la presente investigación generará mapas de riesgo sísmico que identificarán y diferenciarán zonas con un cierto grado de riesgo, esto con la finalidad de focalizar las acciones de mitigación que se deberían realizar por parte de los tomadores de decisiones dentro del marco de la Gestión de Riesgos de Desastres.

En consecuencia, para la evaluación del riesgo sísmico se empleará el software CAPRAGIS v2.4.0, cuyas siglas en inglés *Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment*, desarrollado con el apoyo técnico y financiero del Banco Mundial, el Banco Interamericano de Desarrollo y la Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de los Desastres (Cardona et al., 2011). Dentro del software se introducirán los siguientes inputs a través de capas: el peligro sísmico de la zona de estudio, la vulnerabilidad de los sistemas estructurales identificados, efectos de sitio (amplificación de la intensidad sísmica debido a la topografía) y la información de los elementos expuestos.

En ese sentido, luego de realizar la evaluación de riesgo sísmico se identificarán las zonas con mayor riesgo, las cuales se representarán mediante mapas de riesgo sísmico. De la misma manera, se obtendrán y analizarán métricas de riesgo probabilista: pérdida anual esperada (PAE) y pérdida máxima probable (PML). Además, se determinará un escenario que se genere aproximadamente la intensidad producida por un sismo frecuente en la zona de estudio, con el cual se estimarán las pérdidas probables en la cartera de viviendas.

## **CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE RIESGO SÍSMICO EN EL ASENTAMIENTO HUMANO EDÉN DEL MANANTIAL**

En el presente capítulo se muestra los resultados obtenidos en cada procedimiento necesario para la evaluación del riesgo sísmico, para lo cual se siguió el proceso descrito en la metodología: reporte del proceso constructivo, estimación del peligro sísmico en la zona de estudio, determinación de las curvas de vulnerabilidad de las pircas y los sistemas estructurales encontrados y los resultados de la evaluación del riesgo sísmico: mapas de riesgo sísmico y métricas de riesgo.

### **4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS PIRCAS DE LA ZONA DE ESTUDIO**

A continuación se describe el proceso constructivo de los 6 especímenes de muros de piedra en junta seca realizado por los maestros pirqueros de la zona de Villa María del Triunfo. Asimismo, se presenta el procedimiento realizado para determinar el porcentaje de vacíos en 2 pircas junto con los resultados obtenidos.

#### **4.1.1 Proceso constructivo de pircas**

##### **4.1.1.1 Generalidades:**

Es importante mencionar que la finalidad en esta etapa de la investigación fue conocer la técnica común utilizada por los maestros pirqueros de la zona de Villa María del Triunfo. En ese sentido, los maestros pirqueros no recibieron ninguna indicación y/o corrección en todo el proceso, es decir tenían la disposición y libertad de emplear su propio método y procedimiento de construcción.

De acuerdo con las entrevistas realizadas a los maestros pirqueros, la técnica empleada fue aprendida, asimilada y desarrollada de manera empírica a través de la experiencia de construcción de una gran cantidad de muros tipo pirca. Asimismo, es claro que estas construcciones presentan rasgos y aportes de culturas andinas antiguas como la incaica, lo cual se puede notar en la similitud que guardan estas construcciones.

##### **4.1.1.2 Herramientas y equipos utilizados:**

La construcción de pircas en asentamientos humanos se realiza de manera informal, generalmente sin equipos de protección individual (EPI) y sin algún tipo de seguros contra accidentes. Sin embargo, para esta simulación el proyecto N° 109-2017-FONDECYT

proporcionó EPI y aseguró a ambos maestros pirqueros ante cualquier emergencia o accidente. Entre las herramientas y equipos utilizados se presentan los siguientes:

- Comba
- Cincel
- Escalera tijera bilateral metálica
- Wincha
- Equipos de protección individual (guantes, lentes de seguridad, botas de seguridad y chalecos) según la norma G.050 – seguridad durante la construcción.

#### 4.1.1.3 Habilitación de materiales:

Las piedras utilizadas en la construcción de las pircas fueron extraídas de canteras del Asentamiento Humano Unión Santa Fe en el distrito de Villa María del Triunfo, en el cual es práctica común que los pobladores reúnan estas piedras en ciertas áreas específicas para su empleo en este tipo de construcciones. En la Figura 24 se muestra la habilitación de estos materiales por parte de los mismos maestros pirqueros, esto con la finalidad de que se tenga la opción de escoger la forma y el tamaño de las piedras requeridas para la construcción de pircas. Asimismo, para facilitar el proceso de habilitación y selección, los maestros pirqueros recibieron el apoyo de familiares y/o vecinos, práctica muy común en la construcción de estas estructuras (Figura 24). Posteriormente, los materiales seleccionados fueron trasladados hacia el Campus Usil, lugar donde se realizó la construcción, mediante un volquete (Figura 25), el cual fue financiado por el proyecto N° 109-2017-FONDECYT.



*Figura 24. Habilitación de rocas en Villa María del Triunfo*



Figura 25. Descarga de las rocas dentro del lugar de trabajo.

#### 4.1.1.4 Trazado de medidas preliminares:

El proceso de construcción inicia con el trazado de las dimensiones proyectadas del muro, generalmente ancho y altura. Para este procedimiento se utiliza un cordel de lado a lado y se marca la medida proyectada mediante el empleo de yeso o algún tipo de marcador, para las pircas de 1 m y 1.5 m de altura se marcó 50 cm y 60 cm de ancho respectivamente, tal como se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Colocación de piedras en la base



Luego de ello, se procede a colocar la primera hilada de piedras siguiendo el límite de la marca proyectada. Además, es importante mencionar que se realizó una constante verificación del ancho de la pirca a medida que esta crecía en altura, tal como se muestra en la Figura 27. En ese sentido, el ancho de la pirca fue constante aproximadamente en toda su altura; no obstante, es común que estos muros presenten cierta pendiente o inclinación en sus caras frontales y posteriores.



*Figura 27. Verificación de ancho de muro*

#### **4.1.1.5 Construcción de la base del muro**

La base de la pirca está conformada generalmente por piedras de mayor dimensión y/o tamaño en comparación con las utilizadas en la parte superior, las cuales permiten una distribución homogénea del peso del muro a la fundación tal como se muestra en la Figura 28. Este procedimiento genera una mayor estabilidad en el muro debido a que los elementos de la base soportarán eficientemente las mayores presiones que se producen en la parte inferior de la pirca. Por otro lado, la base representa la etapa más complicada y rigurosa del proceso, puesto que se debe tener mayor precisión y cuidado en cuanto a las dimensiones debido a que sirven como guía para el proceso constructivo posterior.

Asimismo, esta fase de construcción es fundamental dentro del comportamiento del muro debido a que deficiencias en esta podrían generar con facilidad fallas de deslizamiento y/o abultamiento en la base de la pirca.



Figura 28. Colocación de piedras en base de muro.

#### 4.1.1.6 Construcción del cuerpo del muro

La construcción del cuerpo del muro requiere utilizar piedras de ligero menor tamaño en comparación con los bloques de la base, las cuales son seleccionadas por la pericia y experiencia de los maestros pirqueros con la finalidad de generar un mecanismo de estabilidad y amarre entre los bloques. De acuerdo con McCombie et al. (2015), se pueden distinguir dos técnicas y/o metodologías utilizadas para la construcción de muros de piedra en junta seca a partir del empleo de piedras de enlace largas, conocidas como *through stones*. Estas piedras de enlace se extienden de manera regular y continua en todo el largo y alto del muro con el objetivo de conectar la cara exterior y la parte posterior de la pirca. En la Figura 29 se muestra dos muros de piedra con ambas técnicas de construcción; asimismo, es importante mencionar que el empleo de *through stones* en el muro (b) garantiza una mayor estabilidad en comparación con el muro (a). Por lo tanto, se recomienda su uso de manera continua en todo el largo y alto de la pirca.

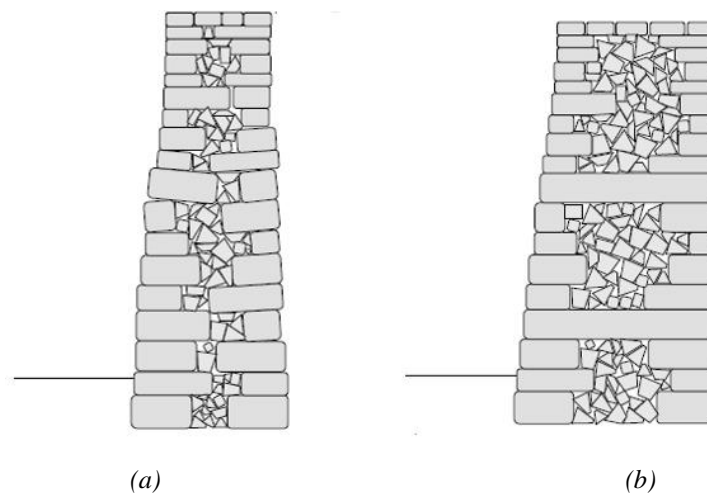


Figura 29. (a) Pirca con relleno interior sin “*through stones*”, (b) Pirca con empleo de “*through stones*”. Fuente: McCombie et al. (2015)

De acuerdo con lo observado en el proceso de construcción de las seis pircas, se determinó que los maestros pirqueros utilizaban ambos métodos de construcción; no obstante, su empleo no se realizaba de forma tecnificada. En la Figura 30 se muestra el empleo de un *through stone* en la construcción de una de las pircas realizadas en esta investigación; sin embargo, es necesario una mayor cantidad y distribución óptima de este tipo de bloques para lograr el objetivo deseado. Por otro lado, otra alternativa al uso de *through stones* con menor eficiencia, cuando no se dispone de piedras largas de enlace, es el empleo de bloques traslapados que tratan de replicar la función de amarre entre las caras del muro.

Por consiguiente, a partir de la experiencia reportada, un punto importante en la construcción de pircas es la disponibilidad materiales (piedras), con una variedad de tamaños, los cuales permitan cumplir funciones específicas como por ejemplo enlazar la cara exterior y posterior de la pirca. En consecuencia, una correcta y eficiente ubicación de los bloques de piedra logrará una mayor resistencia y estabilidad en el muro.



Figura 30. *Through stone* en pirca ensayada a escala natural. Fuente: Proyecto N° 109-2017-FONDECYT

Asimismo, en la Figura 31 se muestra el otro método de construcción utilizado por los maestros pirqueros, el cual consistía en la colocación de piedras de tamaño considerable en ambas caras del muro y colocar en medio de ellas piedras de menor tamaño (relleno). Este procedimiento se realiza cuando no se cuenta con bloques de piedra de gran tamaño que cubran todo el ancho del muro. En consecuencia, este método de construcción generará muros más vulnerables que los muros que emplean gradualmente *through stones*, lo cual es ocasionado por la falta de bloques que unan ambas caras del muro.





Figura 31. Forma de construcción de las pircas

Adicionalmente, luego de culminar la construcción del muro se procedió a fijar los vacíos que quedaron entre los bloques de la cara exterior de la pirca mediante piedras pequeñas conocidas como “cuñas” tal como se muestra en la Figura 32. Para este proceso se utilizó la comba, la cual permitía fijar cada bloque de piedra expuesto con el objetivo de lograr una aparente mayor estabilidad en el muro.

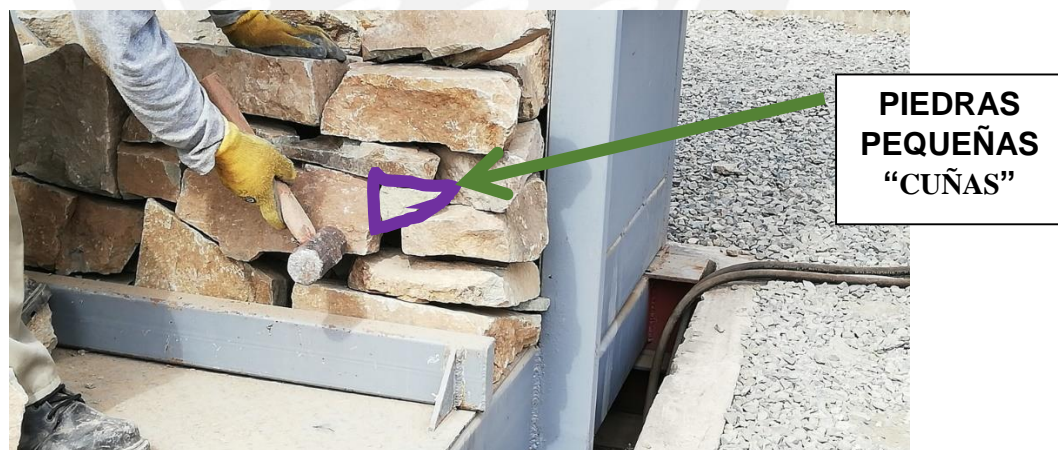


Figura 32. Proceso de encaje de bloques mediante cuñas.



#### 4.1.1.7 Acabado del muro

Los muros de piedra en junta seca no tienen ningún aglomerante y/o mortero entre sus bloques. En ese sentido, no existe algún acabado final en estos muros tal como se muestra en la Figura 33 (a). Sin embargo, es bastante común que se coloque un acabado de mortero de cemento, llamado comúnmente “chicoteo” o “pañeteo” (Figura 33 (b)), de acuerdo con los maestros pirqueros esta adición generalmente no tiene algún efecto de mejora estructural y su uso solo sirve para evitar que animales o insectos puedan introducirse dentro del muro y ocasionar degradación y deterioro.



(a)

(b)

Figura 33. (a) Pirca con junta seca sin acabado, (b) Pirca con acabado de mortero de cemento “pañeteo” Fuente: Rivas (2019)

Finalmente, algunos autores recomiendan colocar una última capa de bloques constituida por grandes y pesadas piedras con el objetivo de fijar y conectar las piedras ubicadas en las caras inferiores del muro, estos elementos son conocidos como *coping stones* y se muestran en la Figura 34. Adicionalmente, estas piedras de gran tamaño servirán de protección y prevención ante la degradación que pueda sufrir la parte superior del muro debido a que son complicadas de mover por personas o animales.

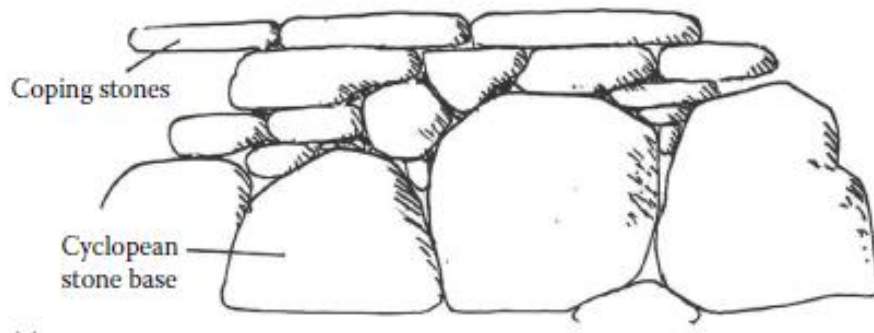


Figura 34. *Coping stones*. Fuente: McCombie et al. (2015)

#### 4.1.2 Porcentaje de vacíos

El porcentaje de vacíos es uno de los parámetros con mayor incidencia en la estabilidad de las pircas, el cual es un factor variable y dependerá de la técnica de construcción, forma de la roca utilizada (angulosa o redondeada) y el tamaño de la misma. En ese sentido, para determinar el porcentaje de vacíos en este tipo de muros de piedra se construyó 2 especímenes de distintas medidas: Pirca 1 y Pirca 2, las cuales se muestran en la Figura 35 respectivamente. Estas pircas fueron construidas utilizando piedras de un mismo origen y se replicó la misma técnica empleada por los maestros pirqueros.

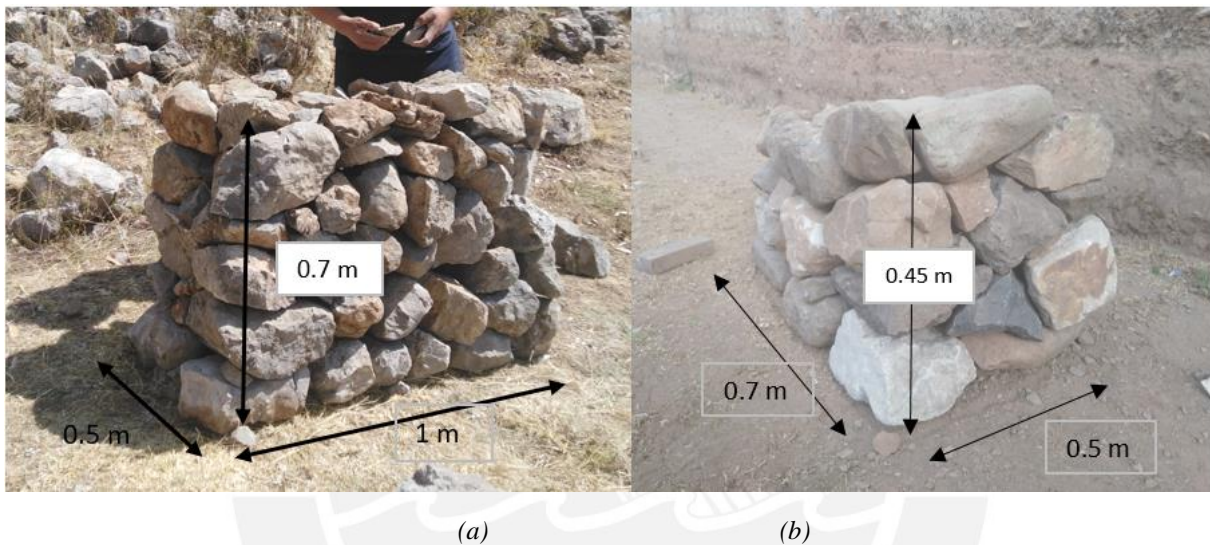


Figura 35. (a) Medidas de Pirca 1 (b) Medidas de Pirca 2

El objetivo de este procedimiento fue obtener la densidad de las piedras utilizadas y con ello el porcentaje de vacíos de un muro de pirca con medidas fijadas previamente. En primer lugar, se realizó un el trazado de medidas preliminares para ambas pircas (Figura 36 (a)); asimismo, se recopiló una gran cantidad de rocas con medidas adecuadas para conformar cada uno de los muros de pirca (habilitación de materiales). En segundo lugar, se procedió a construir el muro replicando la misma técnica descrita en el proceso constructivo. Finalmente, luego de finalizar la construcción de los dos muros de pirca se procedió a verificar las medidas preliminares trazadas (Figura 36 (b)); enseguida, se procedió a medir la masa de cada una de las piedras que conformaban la pirca a través de una balanza, lo cual sirvió para determinar la masa total de la pirca construida.





(a)

(b)

Figura 36. (a) Trazado de medidas preliminares (b) Verificación de medidas establecidas

Luego, de cada pirca construida se extrajo 3 muestras (piedras) con la finalidad de determinar la densidad de cada una de estas mediante el cálculo de la masa y el volumen siguiendo el procedimiento experimental de Arquímedes, en la Figura 37 se muestra el procedimiento para la muestra 3 de la pirca 1.



Figura 37. Calculo experimental de la densidad de la muestra 3

A partir del procedimiento realizado se obtuvo la densidad de las 6 muestras estudiadas, las cuales se muestran en la Tabla 6. Con esta información se concluye que la densidad promedio resulta ser de alrededor de  $26 \text{ KN/m}^3$ , la cual será empleada en el presente análisis. Asimismo, es importante mencionar que el tipo de roca dependerá de la zona de estudio; por lo tanto, para posteriores investigaciones se recomienda realizar ensayos de la roca en laboratorio para obtener valores más precisos.

Tabla 6.  
Resultados obtenidos en las 6 muestras

Nº	Muestra	Masa (kg)	Volumen (L)	Densidad (KN/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio (KN/m <sup>3</sup> )
<b>Pirca 1</b>	1	2.4	0.9	26.160	26.18
	2	3.4	1.23	27.117	
	3	4.25	1.65	25.268	
<b>Pirca 2</b>	1	3.2	1.05	29.897	25.94
	2	3.1	1.3	23.393	
	3	3.7	1.48	24.525	

Finalmente, procedemos a calcular en cada pirca el volumen total de las piedras a partir de los siguientes datos: masa total del muro y densidad promedio. Enseguida, se calcula el porcentaje de vacíos para cada pirca mediante la resta del volumen total y el volumen de piedras respecto al volumen total, el resumen con los resultados obtenidos se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7.  
Porcentaje de vacíos en ambas pircas

Nº	Masa (kg)	Volumen total (m <sup>3</sup> )	Volumen piedras (m <sup>3</sup> )	Volumen de vacíos (m <sup>3</sup> )	% Vacíos
<b>Pirca 1</b>	581.7	0.35	0.218	0.132	38%
<b>Pirca 2</b>	282.85	0.158	0.107	0.051	32%

De acuerdo con los porcentajes de vacíos obtenidos se logra apreciar el alto contenido de estos, lo cual permite inferir el alto grado de reacomodos que se producirían ante algún efecto de cargas. En ese sentido, el análisis posterior empleará un porcentaje de vacíos de 32% debido a que las piedras empleadas y las condiciones de la pirca 2 son muy parecidas a las piedras ensayadas; asimismo, se considera la gran dispersión de estos valores obtenidos debido a que dependen principalmente de la técnica empleada y la disponibilidad de materiales.

#### 4.2 ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE MOVIMIENTO

En este inciso se muestra los resultados obtenidos de la evaluación del peligro sísmico realizado mediante el software CRISIS 2007; de la misma manera, se determina el factor de amplificación de la intensidad debido a la topografía en las laderas del asentamiento humano Edén del Manantial, la cual seguirá el proceso mostrado en la metodología.

#### 4.2.1 Máxima aceleración del terreno (PGA)

La estimación del peligro sísmico se realizó considerando el efecto de las 33 fuentes sísmogénicas propuestas por el IGP (2014) siguiendo la metodología del PSHA descrita en los capítulos previos. Como se planteó en la metodología, el análisis de peligro sísmico se evaluó en el Asentamiento Humano Edén del Manantial, cuyas coordenadas geográficas son:  $-12.141848^\circ$ ,  $-76.924507^\circ$ . En la Figura 38 se muestra el mapa de peligro sísmico del distrito de Villa María del Triunfo y la ubicación del punto de análisis para un periodo de retorno de 75 años (sismo ocasional) proporcionado por el programa CRISIS 2007. De la misma manera, a partir de dicho mapa se obtiene el PGA en la coordenada de análisis cuyo valor resulta de 224 gales (0.223 g), valor próximo al estimado en la costa oeste de América del Sur (Tabla 8).

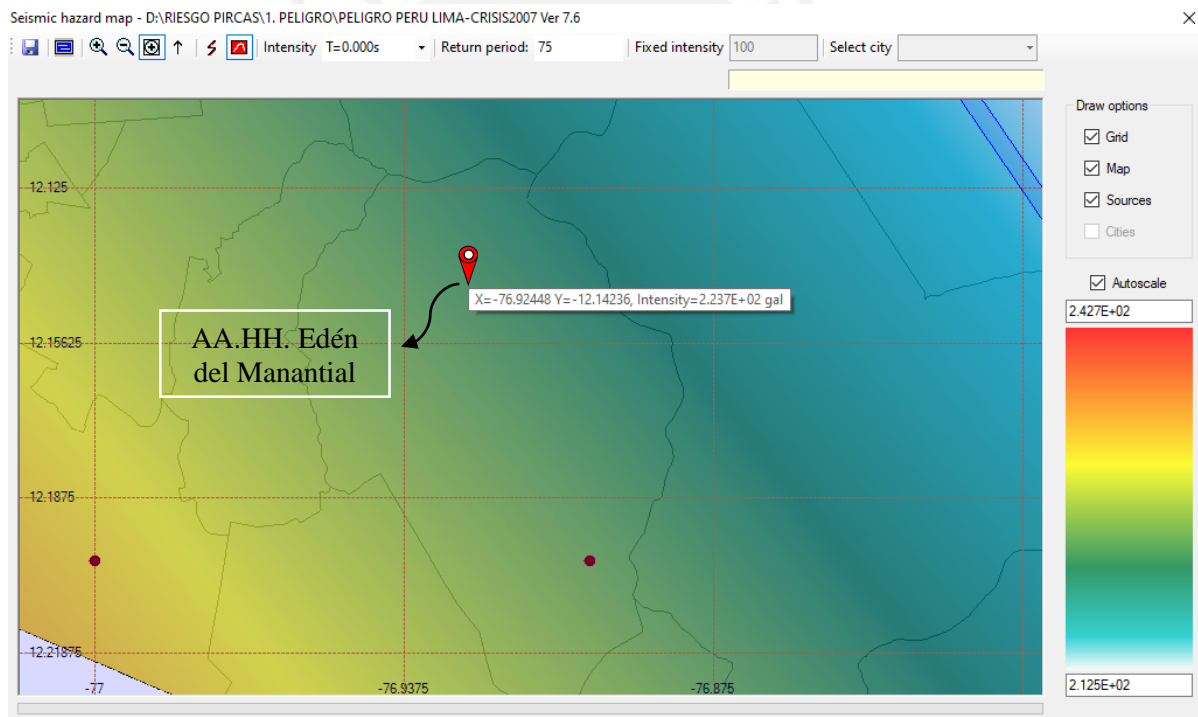


Figura 38. Mapa de peligro sísmico para Lima Metropolitana ( $Tr = 75$  años)

En la Figura 39 se muestra los espectros de peligro uniforme obtenidos del software Crisis 2007 para los cuatro sismos de diseño propuestos por el SEAOC Visión 2000, en el cual se aprecia que los picos máximos de aceleración se dan aproximadamente para un periodo estructural de 0.2 s.

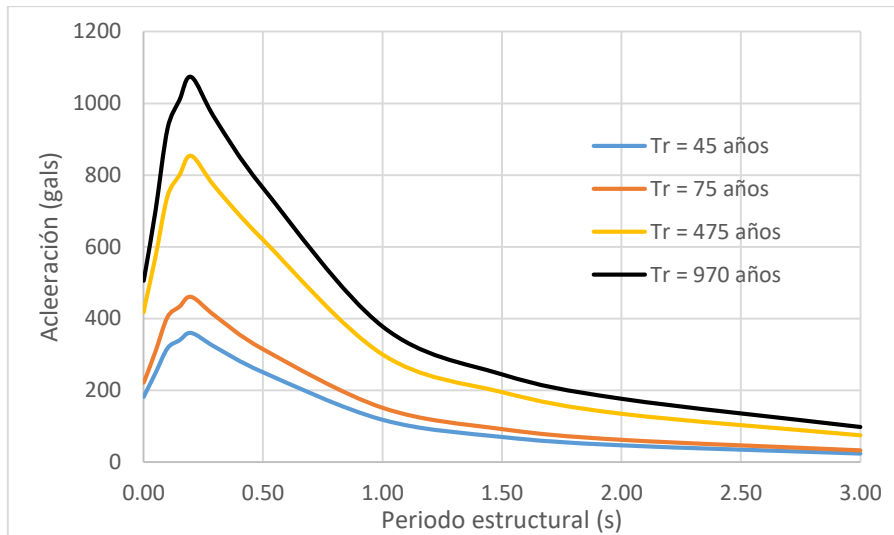


Figura 39. Espectro de peligro uniforme para los cuatro sismos de diseño

Asimismo, para verificar el modelo realizado se comparó los espectros de peligro uniforme mostrados en la Figura 39 con los obtenidos de la plataforma en línea de SENCICO, la cual se presenta en la Figura 40. En ambas graficas se observa una clara similitud en los resultados; sin embargo, existen algunas diferencias en los espectros de 970 años y 475 años de periodo de retorno debido a que los proporcionados por SENCICO son valores mayores y por tanto mucho más conservadores. Estas diferencias se deben principalmente al uso de un número menor de fuentes sismogénicas, 29 fuentes sismogénicas en total, y a una mayor cantidad de ecuaciones de predicción del movimiento del suelo utilizadas en el modelo de SENCICO (2016), a pesar de ello, los valores obtenidos son bastante aceptables para un estudio de peligro sísmico probabilístico que alberga considerables las incertidumbres en su procedimiento.

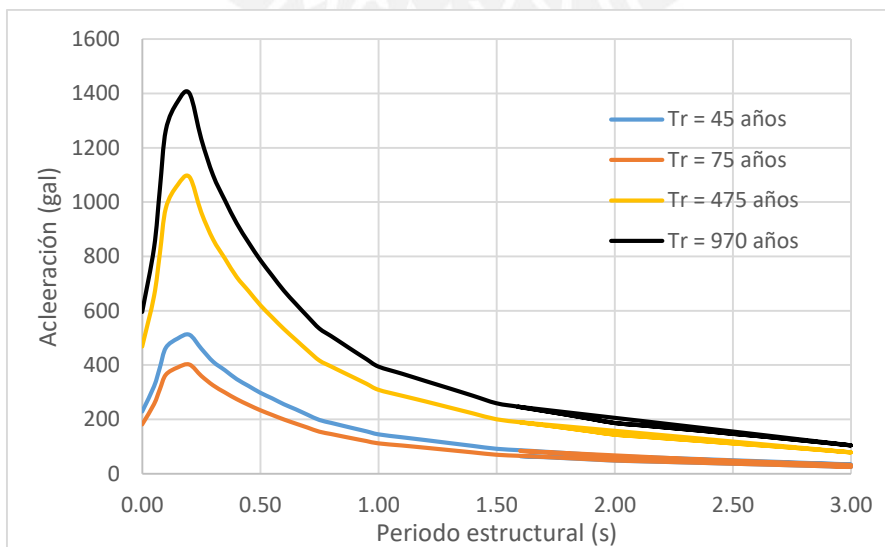


Figura 40. Espectros de peligro uniforme obtenido de SENCICO



#### 4.2.2 Amplificación sísmica por efectos topográficos (PGA\*)

Los asentamientos humanos ubicados en la periferia del distrito de Villa María del Triunfo se encuentran generalmente sobre terrenos inclinados con gran pendiente, lo cual incrementa su peligro sísmico (intensidad) en comparación con terrenos planos. En ese sentido, existen estudios realizados por el INGEMMET que datan de los años 2006, 2007 y 2008, en los cuales se presenta información geológica y de peligro físico de una gran cantidad de asentamientos humanos en este distrito. De acuerdo con dicha información la mayoría de asentamientos humanos se encuentran sobre laderas de pendiente de que van de  $20^\circ$  al  $35^\circ$ , lo cual implica un alto riesgo ante eventos sísmicos, caída de rocas entre otros. De la misma manera, el asentamiento humano Edén del Manantial presenta una topografía con pendientes considerables mostradas en estudios realizados por el INGEMMET en el año 2005.

En la Figura 41 se muestra una vista aérea del lugar de análisis, en donde se logra apreciar una gran cantidad de población ubicada y asentada en laderas de cerros. Por lo tanto, a partir de un perfil topográfico del AAHH Edén del Manantial, generado en el software Google Earth y mostrado en la Figura 42, se obtuvo pendientes de alrededor de  $18^\circ$  (30%) logrando llegar a pendientes de  $40^\circ$  (60%), estas pendientes moderadas del terreno amplificarán las ondas sísmicas logrando un incremento en el PGA de la zona analizada.

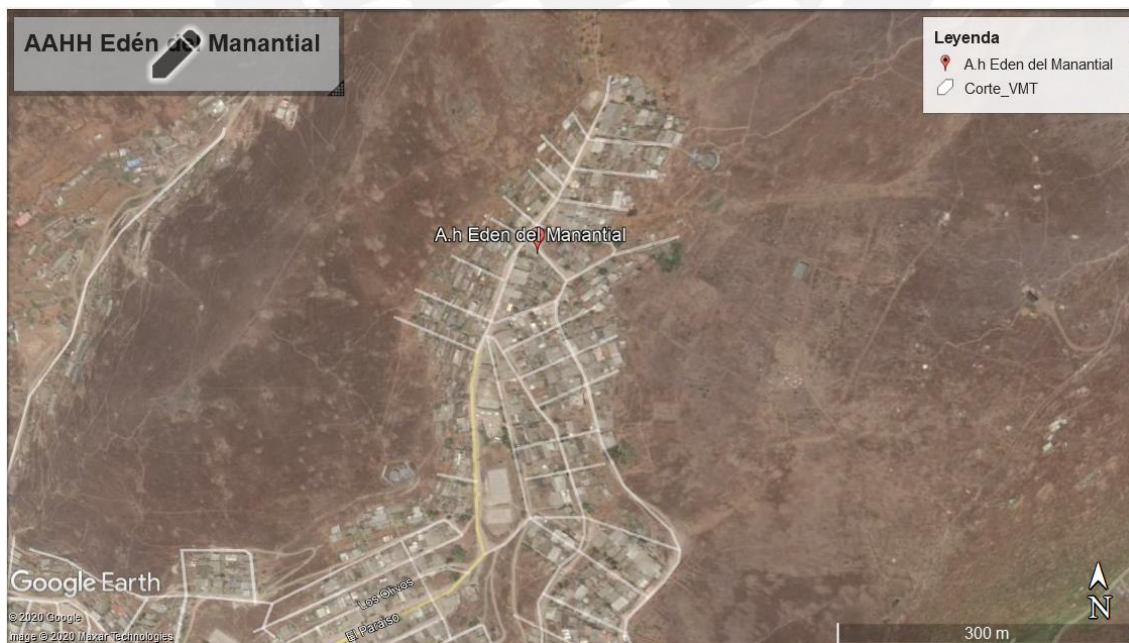


Figura 41. Vista aérea del asentamiento humano Edén del Manantial. Fuente: Google Earth



Figura 42. Perfil topográfico de la ladera en zona de estudio

En ese sentido, se utilizará la expresión propuesta por Pagliaroli et al. (2007) para determinar el factor de amplificación topográfica ( $S_T$ ) para esto se tomará como referencia de análisis la cota de 527m mostrada en la Figura 42; en consecuencia, se tendrán los siguientes datos de entrada: altura de talud ( $H = 32$  m) y longitud horizontal de pie del talud ( $L = 89$  m).

Se emplea la ecuación 14 para obtener un factor de amplificación de  $S_T = 1.35$ ; sin embargo, se tomará de forma conservadora un factor de 1.4, el cual cumple la recomendación propuesta por el Eurocódigo 8:  $S_T \geq 1.2$  para inclinaciones de talud mayores a  $15^\circ$ . En la Tabla 8 se muestra los valores de PGA amplificados por el efecto topográfico.

Tabla 8.

PGA amplificado por efecto topográfico

Sismo de diseño	PGA (gal)	PGA - Amplificado (gal)	PGA - Amplificado (g)
Frecuente	183	256	0.26g
Ocasional	224	313	0.32g
Raro	410	574	0.59g
Muy raro	512	716	0.73g



### 4.3 CÁLCULO DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LAS PIRCAS

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos estáticos para cada espécimen, estos resultados permitirán construir curvas de capacidad y vulnerabilidad de pircas de 1m y 1.5m de altura. De la misma manera, se realiza la comparación de las curvas de daño esperado obtenidas con las curvas determinadas por Zanelli (2019).

#### 4.3.1 Resultados de ensayos en mesa inclinable para ensayos estáticos

En cada ensayo realizado se midió los desplazamientos producidos por incremento angular de la plataforma. En la Figura 43 y 45 se aprecia la distribución de los 9 puntos de medición para el muro tipo 1 y los 12 puntos de medición para el muro tipo 2 respectivamente, en ambos casos los puntos de la base tendrán un valor de desplazamiento nulo debido a que la base se considerará fija. El proceso de mediciones se realizó mediante un equipo de estación total cuya información fue calibrada para generar desplazamientos absolutos debido a que se existían desplazamientos relativos a causa del giro de la plataforma de ensayos.

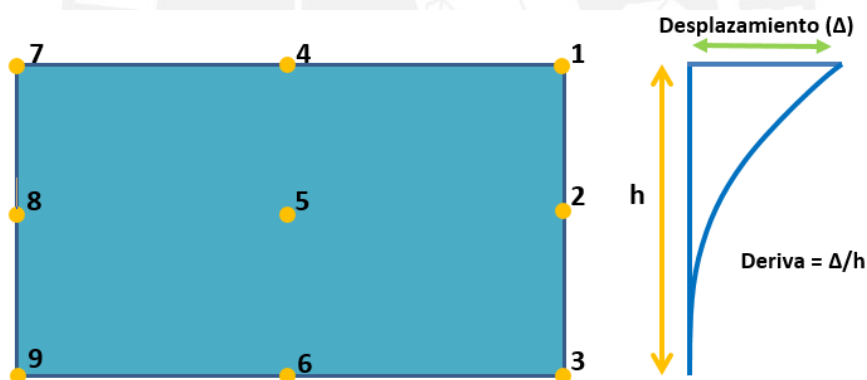


Figura 43. Distribución de puntos de medida muro tipo 1 ( $H=1\text{ m}$ )

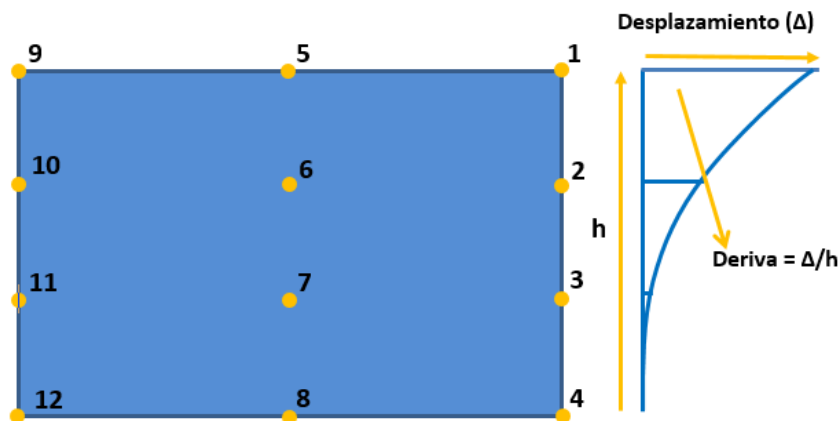


Figura 44. Distribución de puntos de medida muro tipo 2 ( $H= 1.5\text{m}$ )

Asimismo, para el presente análisis se calculó el peso de la pirca considerando un porcentaje de vacíos entre bloques del 32% y un peso específico de las rocas de 27.67 kN/m<sup>3</sup>, este último dato fue obtenido del promedio de tres muestras ensayadas en laboratorio cuyos resultados se muestran en la tesis de Rivas (2019). En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 9.

Obtención del peso de pirca para ambas tipologías

Muro tipo	Volumen (m <sup>3</sup> )	% Vacíos	Volumen solo piedras (m <sup>3</sup> )	Peso específico de roca (KN/m <sup>3</sup> )	Peso de pirca (KN)
1	2	0.32	1.36	27.67	37.63
2	3.6	0.32	2.45	27.67	67.74

Finalmente, con la información obtenida de los ensayos realizados se obtuvo el ángulo de colapso y en consecuencia la fuerza horizontal de colapso para cada uno de los 6 especímenes, cuyos resultados se muestran en las Tabla 10 y 11.

Tabla 10.

Ángulo y fuerza horizontal de colapso para muro tipo 1 (H = 1m)

Muro tipo 1	Peso del muro (kN)	Ángulo de colapso (°)	Ángulo promedio(°)	Fuerza horizontal de colapso (kN)
Espécimen 1	37.63	16.6	18	10.8
Espécimen 2	37.63	17.2		11.1
Espécimen 3	37.63	20		12.9

Tabla 11.

Ángulo y fuerza horizontal de colapso para muro tipo 2 (H = 1.5m)

Muro tipo 2	Peso del muro (kN)	Ángulo de colapso (°)	Ángulo promedio(°)	Fuerza horizontal de colapso (kN)
Espécimen 1	67.74	14.2	15	16.62
Espécimen 2	67.74	15		17.53
Espécimen 3	67.74	15		17.53

A partir de ambas tablas se logra apreciar que el ángulo de colapso disminuye para el caso del muro tipo 2; asimismo, para el caso del muro tipo 1 existe una mayor variabilidad en los ángulos obtenidos en comparación con los resultados del muro tipo 2, lo cual verifica la gran incertidumbre en la construcción de estas estructuras.

#### 4.3.2 Curvas de capacidad

A partir de los datos obtenidos de los ensayos experimentales estáticos se procedió a construir las curvas de capacidad para cada uno de los 6 especímenes, para esto se tomó

en cuenta el ángulo de rotación de la plataforma, el peso total de la pirca y la deriva en la parte superior del muro tomada en cada inclinación de la mesa de ensayo. En ese sentido, para el cálculo la deriva se utilizó el promedio de desplazamientos en los puntos superiores 1, 4 y 7 para el muro tipo 1 (Figura 43) y en los puntos 1, 5 y 9 para el muro tipo 2 (Figura 44). A manera de ejemplo, en la Tabla 12 se presenta los desplazamientos promedios a una misma altura para el muro tipo 1, espécimen N° 1.

Tabla 12.

Resultados promedios para muro tipo 1 ( $H = 1m$ ), espécimen N° 1

Punto	h (cm)	Inclinación en grados								
		5°			10°			15°		
		$\Delta$ (mm)	$\sigma$	$\Delta/h$ %	$\Delta$ (mm)	$\sigma$	$\Delta/h$ %	$\Delta$ (mm)	$\sigma$	$\Delta/h$ %
1-4-6	100	7.67	3.45	0.77	8.01	0.34	0.80	14.02	2.88	1.40
2-5-7	50	3.16	0.58	0.63	2.82	0.12	0.56	5.61	0.72	1.12
3-6-9	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Nota:  $\Delta$ : Desplazamiento en milímetros,  $\sigma$ : Desviación estándar de desplazamientos y  $\Delta/h$ : Deriva promedio

Finalmente, en las Figura 45 y 45 se muestran las curvas de capacidad para los muros tipo 1 y muros tipo 2 respectivamente, donde las abscisas están representadas por la deriva promedio en la altura total del muro y en las ordenadas por el porcentaje de cortante obtenida con respecto al peso total de la pirca.

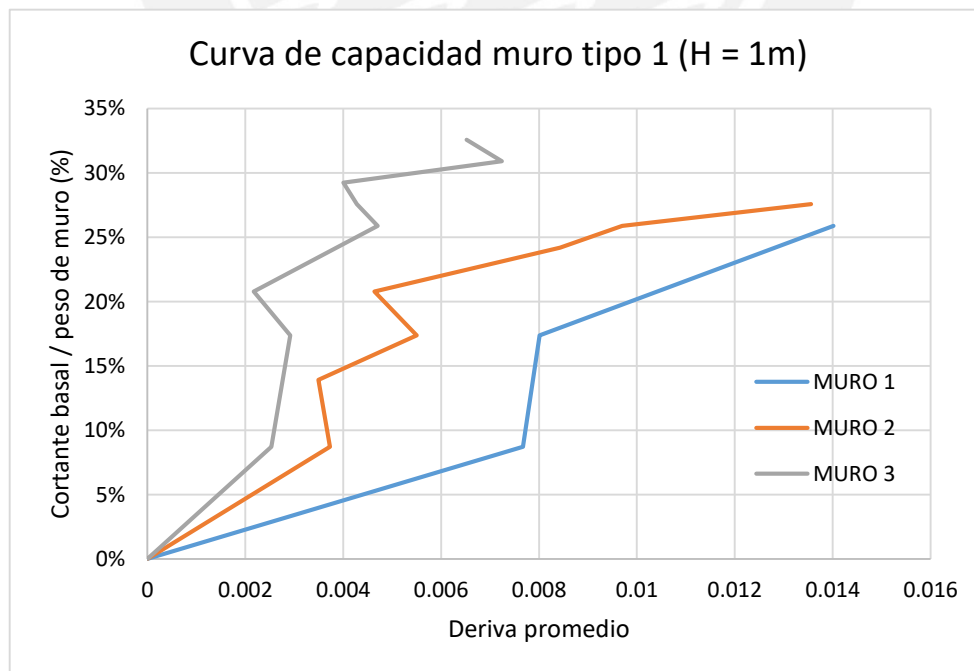


Figura 45. Curva de capacidad para muros tipo 1 ( $H = 1m$ ).

Fuente: Proyecto N° 109-2017-FONDECYT (2020)

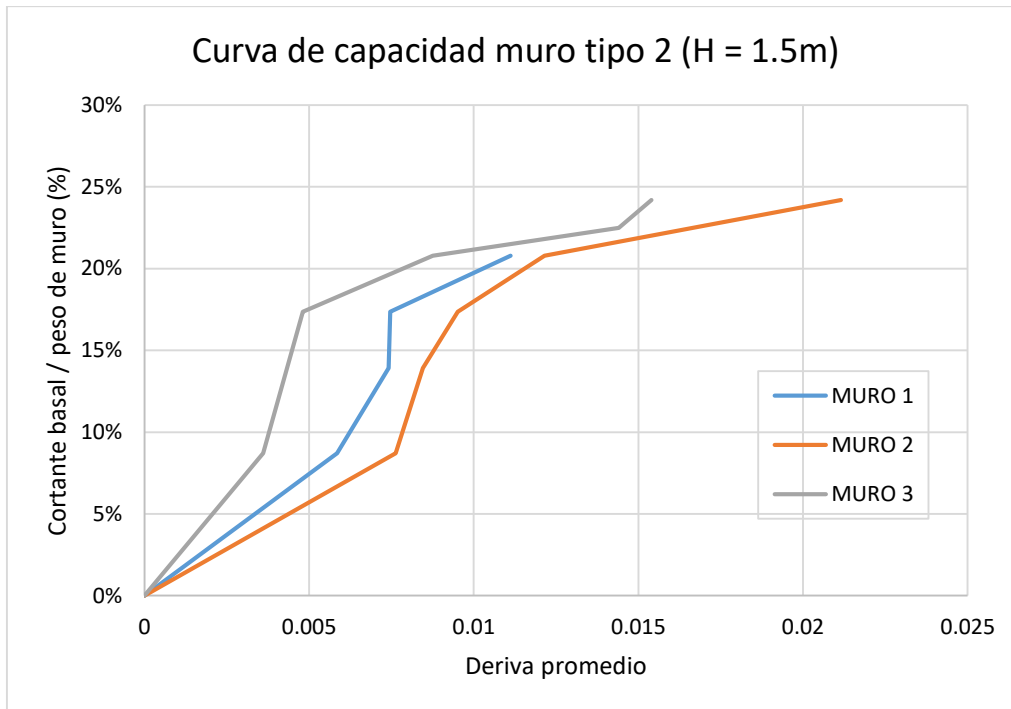


Figura 46. Curvas de capacidad para muros tipo 2 (H = 1.5m)

Fuente: Proyecto N° 109-2017-FONDECYT (2020)

A partir de estas gráficas se logra apreciar que las curvas de capacidad del muro tipo 1 no presentan un comportamiento uniforme y tienden a cierto patrón errático mientras que las curvas de capacidad del muro tipo 2 presentan una misma tendencia al incrementar la cortante basal o el ángulo de inclinación de la plataforma. Sin embargo, estos resultados variados se deben a que las pircas son estructuras flexibles con comportamiento compuesto y complejo, lo cual se verifica en la diferencia significativa de desplazamientos a una misma altura.

### 4.3.3 Método Pseudoestático

Mediante el análisis pseudoestático utilizando el método de Coulomb, Saragoni y Mononobe Okabe se procedió a obtener la aceleración que ocasiona el colapso de cada uno de los especímenes ensayados, las fuerzas actuantes sobre la pirca se muestran en la Figura 47. Entre ellas se considera la sobrecarga generada por el peso de la vivienda, empuje activo del relleno, la amplificación sísmica ocasionada por el movimiento sísmico y la fuerza inercial en la pirca. Una de las consideraciones importantes para el análisis de fuerzas fue considerar una altura de 0.75m y 1m para las pircas tipo 1 y tipo 2 respectivamente. Esto debido a que se conoce por el proceso constructivo que la base está

compuesta por grandes bloques compactados que generarían empujes despreciables; asimismo, dicha asunción permite obtener valores mucho más coherentes y similares a la realidad.

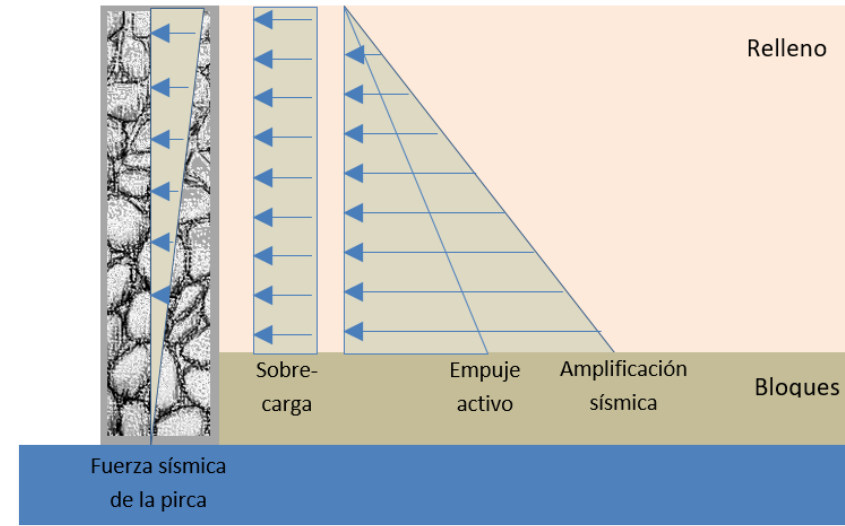


Figura 47. Fuerzas analizadas en pircas

En la Tabla 13 se muestra el resumen de las fuerzas resultantes obtenidas en porcentaje del peso de las pircas para cada uno de los especímenes analizados. Asimismo, se muestra la aceleración de colapso en cada espécimen, se puede apreciar una variabilidad considerable en cada uno de estos. Se recomienda realizar una mayor cantidad de ensayos en futuras investigaciones para obtener mayor información y una tendencia más confiable.

Tabla 13.

Fuerzas resultantes en porcentaje respecto del peso del muro

Tipo	Especímen	Ángulo de colapso (°)	Aceleración de colapso (g)	Estático	Sísmico	Inercial	Total Colapso
<b>Muro tipo 1</b>	1	16.6	0.167	22.5%	1.1%	5.0%	28.6%
	2	17.2	0.194	22.5%	1.2%	5.8%	29.6%
	3	20	0.318	22.5%	2.2%	9.5%	34.2%
<b>Muro tipo 2</b>	1	14.2	0.113	20.5%	0.7%	3.4%	24.5%
	2	15	0.148	20.5%	0.9%	4.4%	25.9%
	3	15	0.148	20.5%	0.9%	4.4%	25.9%

Se puede observar que las fuerzas que tienen más incidencia en la pircas son las fuerzas generadas por el empuje activo (estático) que para el muro tipo 1 alcanzan porcentajes alrededor del 23%, lo cual implica que estas estructuras están cargadas cerca de su límite en condiciones estáticas y se encontrarían ante un inminente colapso por ciertas sollicitaciones externas como sismos o sobrecargas.

En la Tabla 14 se muestra el resumen con todas las aceleraciones que ocasionarían el colapso en cada uno de los 6 especímenes. Para los especímenes del Muro Tipo 1, se puede observar una gran variabilidad entre sus valores de aceleración de colapso, lo cual se verifica en su alta desviación estándar y su coeficiente de variación con respecto a los resultados obtenidos para el Muro Tipo 2. Estos valores serán empleados para obtener curvas de fragilidad y posteriormente funciones de daño esperado en ambas tipologías.

Tabla 14.  
Aceleración sísmica de colapso

Tipo	Espéci.	Ángulo (°)	Colapso	Aceleración (g)	Media (g)	Desviación Estándar (g)	C.V.
<b>Muro tipo 1</b>	1	16.6	28.6%	0.167	0.226	0.081	36%
	2	17.2	29.6%	0.194			
	3	20	34.2%	0.318			
<b>Muro tipo 2</b>	1	14.2	24.5%	0.113	0.136	0.020	15%
	2	15	25.9%	0.148			
	3	15	25.9%	0.148			

#### 4.3.4 Curvas de daño y desviación estándar

Las curvas de fragilidad fueron obtenidas de manera experimental, en el cual se consideró un solo estado de daño: Colapso. Esto debido a que en cada uno de los 6 ensayos realizados, no se pudo establecer un daño intermedio común; asimismo, las fallas que se produjeron fueron de manera intempestiva y/o frágil. En ese sentido, se recomienda realizar una mayor cantidad de ensayos experimentales para poder obtener una mayor muestra y obtener curvas mucho más representativas. En la Figura 48 se muestra las curvas de fragilidad obtenidas para las pircas de 1m y 1.5m de altura.

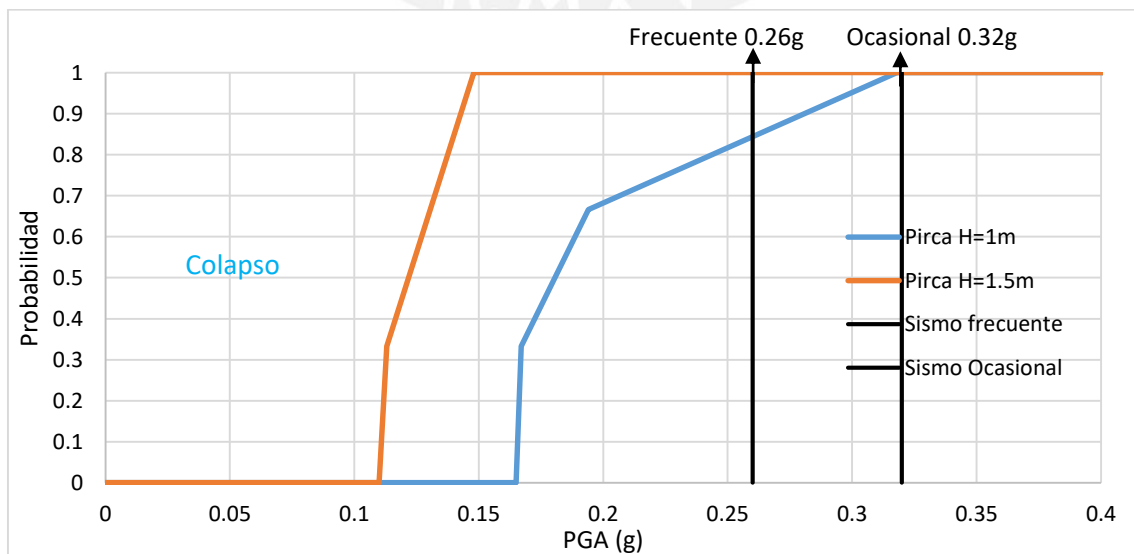


Figura 48. Curvas de Fragilidad

A partir de la figura mostrada se determina que ante un PGA de 0.26g (sismo frecuente) la probabilidad de que las pircas de 1m de altura se encuentren en el estado de daño de colapso es de 0.85; de la misma manera, ante un sismo ocasional la probabilidad de que las pircas de 1m y 1.5m de altura estarían en el estado de daño de colapso es de 1. Es importante mencionar que la forma de estas funciones presentan una cercana similitud a las curvas obtenidas y presentadas en la tesis de Zanelli (2019) debido a que en ambas se puede notar la gran vulnerabilidad ocasionada por su falla frágil o súbita.

Las curvas de fragilidad permitieron obtener las funciones de daño esperado con sus desviaciones estándar respectivas para ambas tipologías, las cuales se muestran en la Figura 49. Se verifica en ambas funciones que la desviación estándar es cero cuando se produzca un daño nulo (0%) o un daño total (100%).

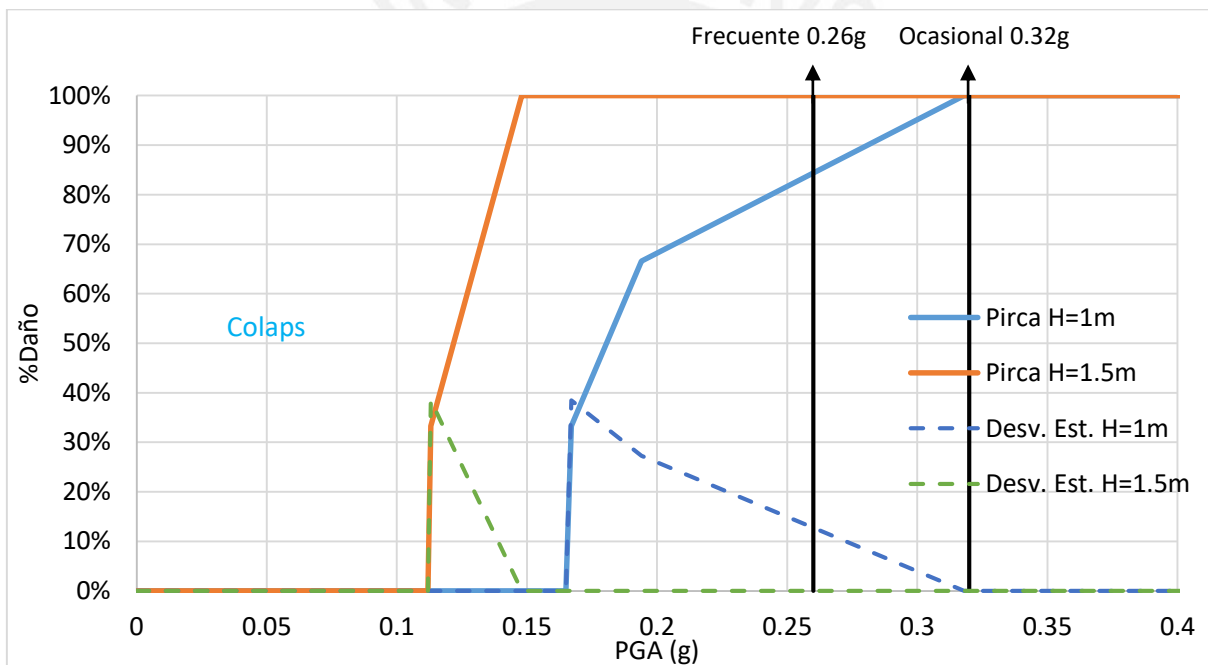


Figura 49. Funciones de valor esperado

A partir de las funciones de daño esperado se logra apreciar que ante un sismo ocasional las pircas de 1m y 1.5m de altura colapsarían, o dicho de otro modo tendrían un 100% daño; asimismo, ante un sismo frecuente las pircas de 1m de altura presentarían un daño promedio cercano al 85%. Además, se observa desviaciones estándar considerables que alcanzan valores del 38% en ambas tipologías, lo cual demuestra la gran variabilidad de los resultados obtenidos al tomar en cuenta solo 3 ensayos experimentales. Por lo tanto, con el objetivo de reducir la desviación estándar y conseguir una mejor caracterización



de estas estructuras es necesario realizar una mayor cantidad de ensayos experimentales en ambas tipologías que brinden una mayor confiabilidad en los resultados.

#### 4.3.5 Comparación

De acuerdo a las curvas de vulnerabilidad de pircas proporcionadas de manera analítica en la tesis de Zanelli (2019) se puede concluir que estas fueron mucho más resistentes, lo cual no se refleja en los resultados experimentales. En ese sentido, se concluye que las pircas estudiadas son mucho más vulnerables y se recomienda calibrar el modelo realizado en software de elementos discretos de dicho estudio. En la Figura 50 se muestran las curvas de vulnerabilidad obtenidas de manera analítica y experimental superpuestas, en las cuales se verifica la mayor fragilidad de los resultados experimentales obtenidos mediante los ensayos estáticos en esta investigación.

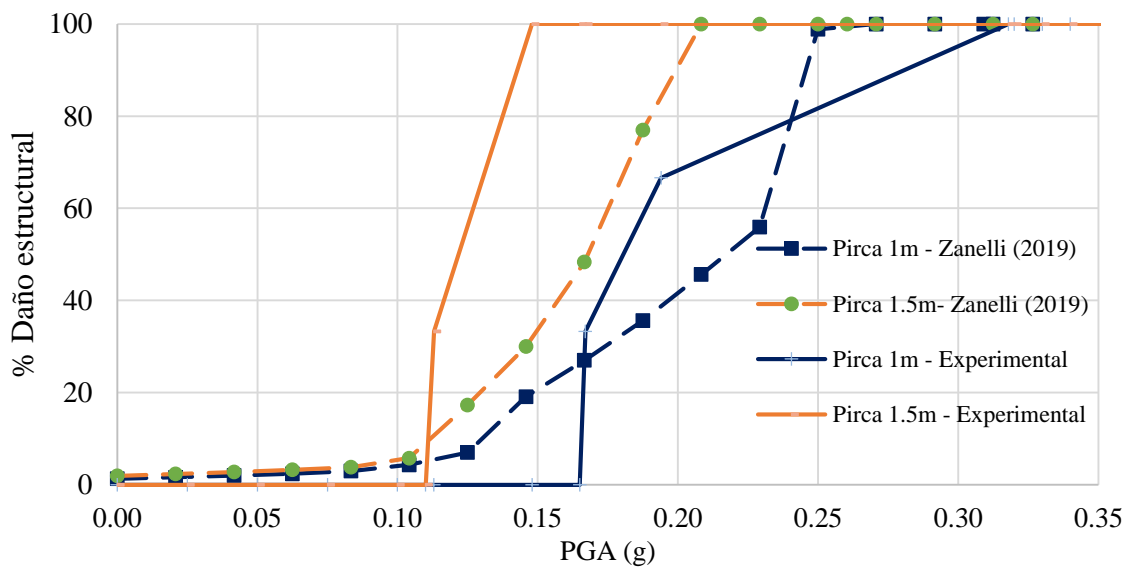


Figura 50. Curvas de daño esperado experimentales y analíticas. Fuente: Zanelli (2019)

De la misma manera, al superponer las curvas de daño esperado de los 3 sistemas estructurales analizados y de los 2 tipos de pircas, tal como se muestra en la Figura 51, se muestra que en todos los casos las pircas son mucho más vulnerables, es decir, al ocurrir un sismo considerable las pircas colapsarían primero y consecuentemente toda la estructura (Zavala, 2018). Por lo tanto, el daño producido en el sistema vivienda-pirca será gobernado por la vulnerabilidad de la pirca para intensidades mayores a 0.1g y gobernado por la vulnerabilidad de la vivienda para intensidades menores. En ese sentido, para el análisis de riesgo se tomará como curva de daño esperado la envolvente de ambas gráficas en el caso del sistema vivienda-pirca dependiendo el sistema estructural presente.

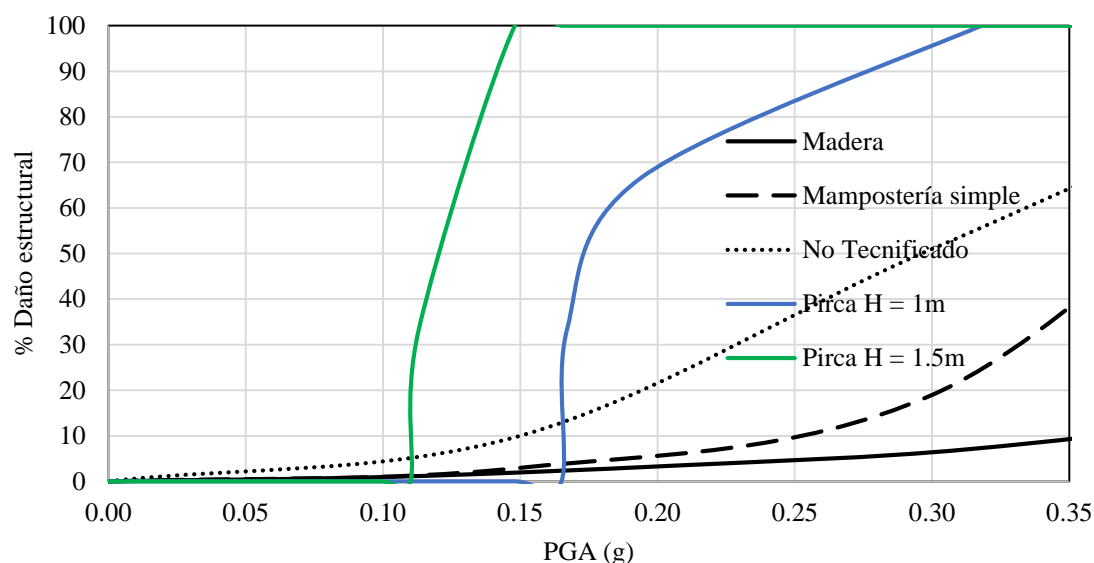
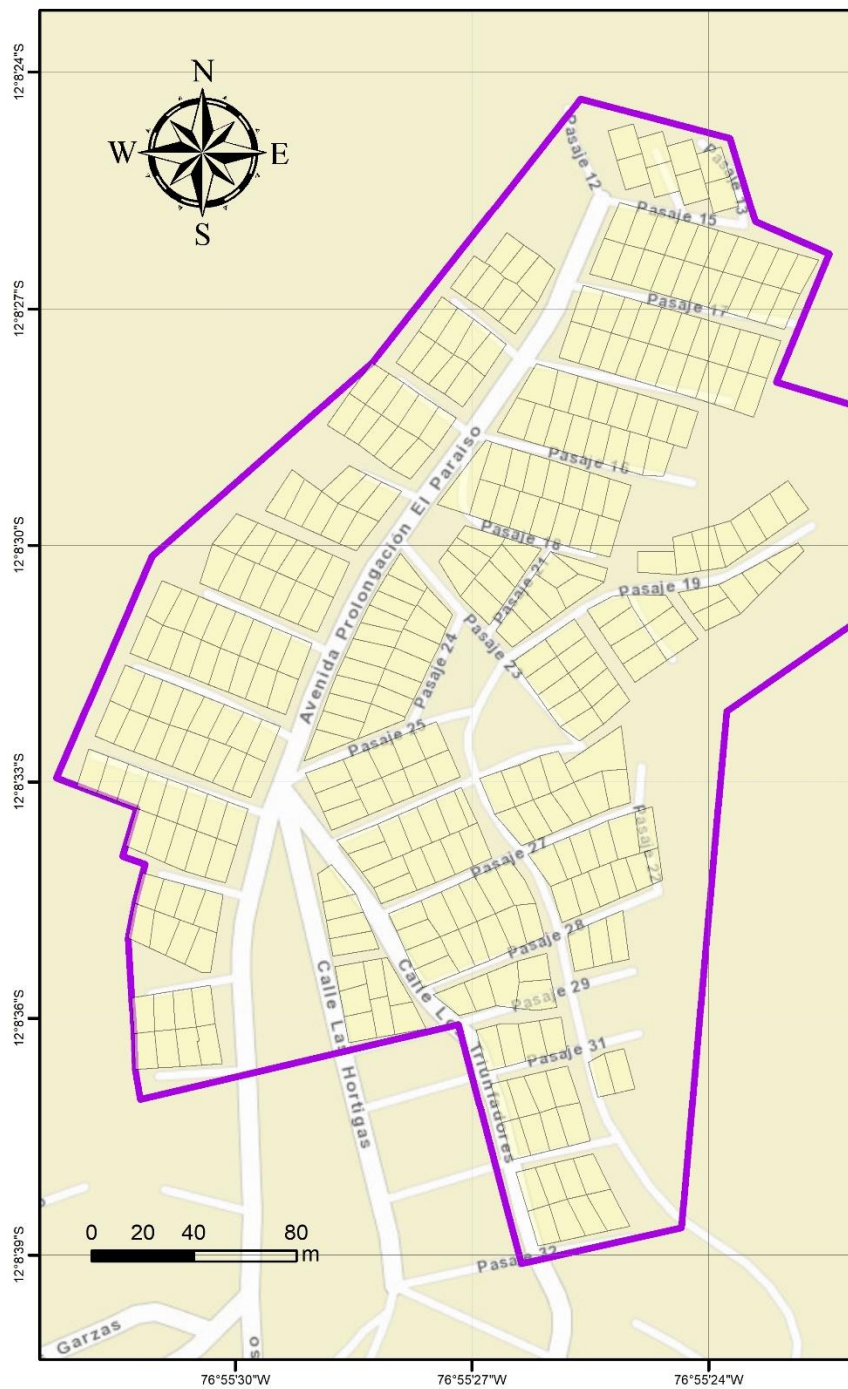


Figura 51. Curvas de daño esperado de pircas y viviendas

Es relevante mencionar que en el caso de las viviendas no tecnificadas, estas presentan un daño significativo a intensidades menores por lo cual su vulnerabilidad si tendrá cierta relevancia al tomar la envolvente como curva de daño esperado en comparación con los otros sistemas estructurales.

#### 4.4 EXPOSICIÓN

La capa de exposición es muy importante para conocer el valor monetario de todos los elementos expuestos ante cierto peligro o amenaza, en este caso representado por la cartera de viviendas. En ese sentido, fue necesario obtener la información catastral e información socioeconómica del distrito de Villa María del Triunfo. Por un lado, se utilizó el mapa catastral a nivel de lotes proporcionado por el COFOPRI en su plataforma en línea GEOLLAQTA. Por otro lado, se empleó información georeferenciada (GIS) del censo del 2017 a nivel de manzanas proporcionada por el INEI. Ambos recursos fueron compatibilizados con la finalidad de extraer la información necesaria para el presente análisis: sistema estructural y costo de viviendas. A partir de dicha información se logró obtener un inventario de la cantidad de viviendas expuestas al peligro sísmico analizado; asimismo, se consideró los 3 sistemas estructurales mostrados en la Tabla 5 para la evaluación de riesgo: mampostería simple, madera y no tecnificado. En la Figura 53 se muestra el mapa catastral del AAHH Edén del Manantial en donde se contabilizó 312 lotes; asimismo en la Figura 53 se muestra el mapa temático a nivel de manzanas con el número de habitantes por manzana en donde se contabilizó un total de 814 personas.



<p><b>PUCP</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA</p>	<b>MAPA CATASTRAL A NIVEL DE LOTES</b> <b>ASENTAMIENTO HUMANO EDÉN DEL MANANTIAL</b> Fuente: COFOPRI (2007)	
	Elaborado por: Bach. Vladimir Ramos Clemente	Fecha: 20/10/2020
	Sistema de Coordenadas Geográficas Datum WGS 84	Escala: 1:3000

Figura 52. Mapa catastral a nivel de lotes. Fuente: COFOPRI (2007)





Manzana	Población	Manzana	Población
010	8	031	25
27B	21	022	24
008	22	035	18
002	19	11A	20
003	21	028	5
013	39	016	3
007	2	26B	17
004	30	09B	23
012	47	036	14
058	24	021	7
33B	11	014	35
015	48	030	28
006	32	025	27
19B	32	029	38
046	23	032	33
059	8	037	11
18B	9	017	5
005	19	01A	24
024	42	<b>TOTAL</b>	<b>814</b>



<b>MAPA CATASTRAL A NIVEL DE MANZANAS</b> <b>ASENTAMIENTO HUMANO EDÉN DEL MANANTIAL</b> Fuente: Censos Nacionales (2017)	
Elaborado por: Bach. Vladimir Ramos Clemente	Fecha: 20/10/2020
Sistema de Coordenadas Geográficas Datum WGS 84	Escala: 1:3000

Figura 53. Mapa a nivel de manzanas. Fuente: INEI (2017)

A partir de los resultados de los Censos Nacionales del 2017, se procedió a cuantificar el número total de viviendas en el AA.HH. Edén del manantial, encontrándose 312 viviendas en total de las cuales 218 de estas presentaban información de los materiales predominantes en su construcción. Enseguida, se clasificó las viviendas según el sistema estructural presente, el cual estuvo basado en el material predominante en las paredes: mampostería simple, madera y no tecnificado tal como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15.

Cantidad de viviendas según el sistema estructural

Sistema estructural	Cantidad de viviendas	Porcentaje (%)
<b>Mampostería Simple</b>	77	35%
<b>Madera</b>	40	18%
<b>No tecnificado</b>	101	46%
<b>Total</b>	218	100%

Fuente: Censos Nacionales del 2017 – INEI

De manera gráfica se muestra el diagrama de pastel con los sistemas estructurales presentes (Figura 54). Esta información será muy relevante para cuantificar el monto expuesto de la cartera de viviendas y asimismo definir la vulnerabilidad presente en cada vivienda.

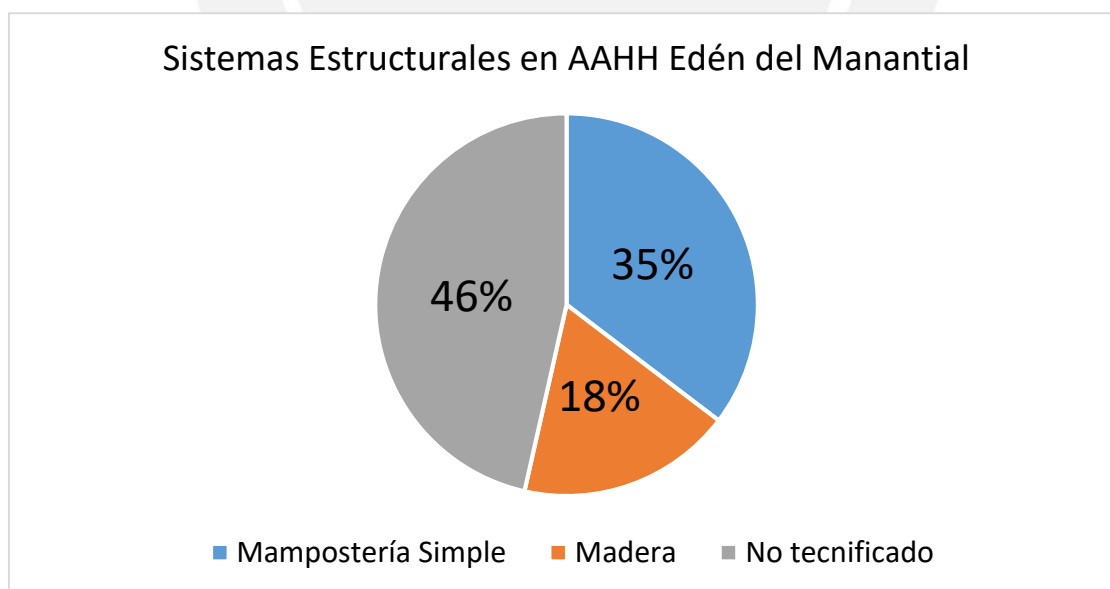


Figura 54. Clasificación de acuerdo al sistema estructural. Fuente: INEI (2017)

Se puede observar que el mayor porcentaje de viviendas, alrededor del 46%, tienen un sistema estructural no tecnificado, el cual según el INEI está conformado por viviendas de triplay, calaminas, esteras entre otros materiales precarios. Enseguida, un 35% de

viviendas de mampostería no confinada conformada principalmente por muros de ladrillos con columnas de confinamiento y finalmente un porcentaje reducido de 18% de viviendas de madera generalmente estructuras prefabricadas.

#### 4.4.1 Mapa de pendientes

Se empleó información de la imagen satelital ALOS PALSAR con una resolución de 12.5m, con la cual se generó el mapa pendientes del distrito de Villa María del Triunfo, para ello se consideró la clasificación de pendientes utilizada por el procedimiento técnico análisis de riesgo (ADR) con fines de formalización realizado por el COFOPRI (2019), la cual se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16.

*Pendientes asociadas al terreno*

<b>Denominación</b>	<b>Pendiente (°)</b>
<b>Muy escarpada</b>	>50°
<b>Abrupta</b>	35°-50°
<b>Fuerte</b>	20°-35°
<b>Moderada</b>	5-20°
<b>Llana y/o suave</b>	<5°

*Adaptado de: Procedimiento Técnico de Análisis de Riesgo (2019)*

En la Figura 55 se muestra el mapa de pendientes del Asentamiento Humano Edén del Manantial superpuesto con el mapa catastral de la zona, en el cual se muestra que esta área está ubicada entre 2 laderas o cerros. De la misma manera, se aprecia claramente 3 zonas diferenciadas: la parte central con pendientes suaves y moderadas, las faldas de laderas con pendientes fuertes y llegando en las partes altas a pendientes abruptas; asimismo, se identificó que en toda el área definida no existen pendientes muy escarpadas (mayores de 50°). Cabe resaltar que de acuerdo con la Norma TH.050 Habilitaciones en riberas y laderas, se considera habilitaciones en laderas aquellas que se realizan en terrenos con pendientes mayores a 20% de pendiente con lo cual las pendientes fuertes y abruptas estarían contempladas en esta categoría.

A partir de esta información, se puede clasificar el número de viviendas correspondientes al rango de pendientes establecido para posteriormente establecer y diferenciar si estas viviendas presentarán pircas en su estructura.

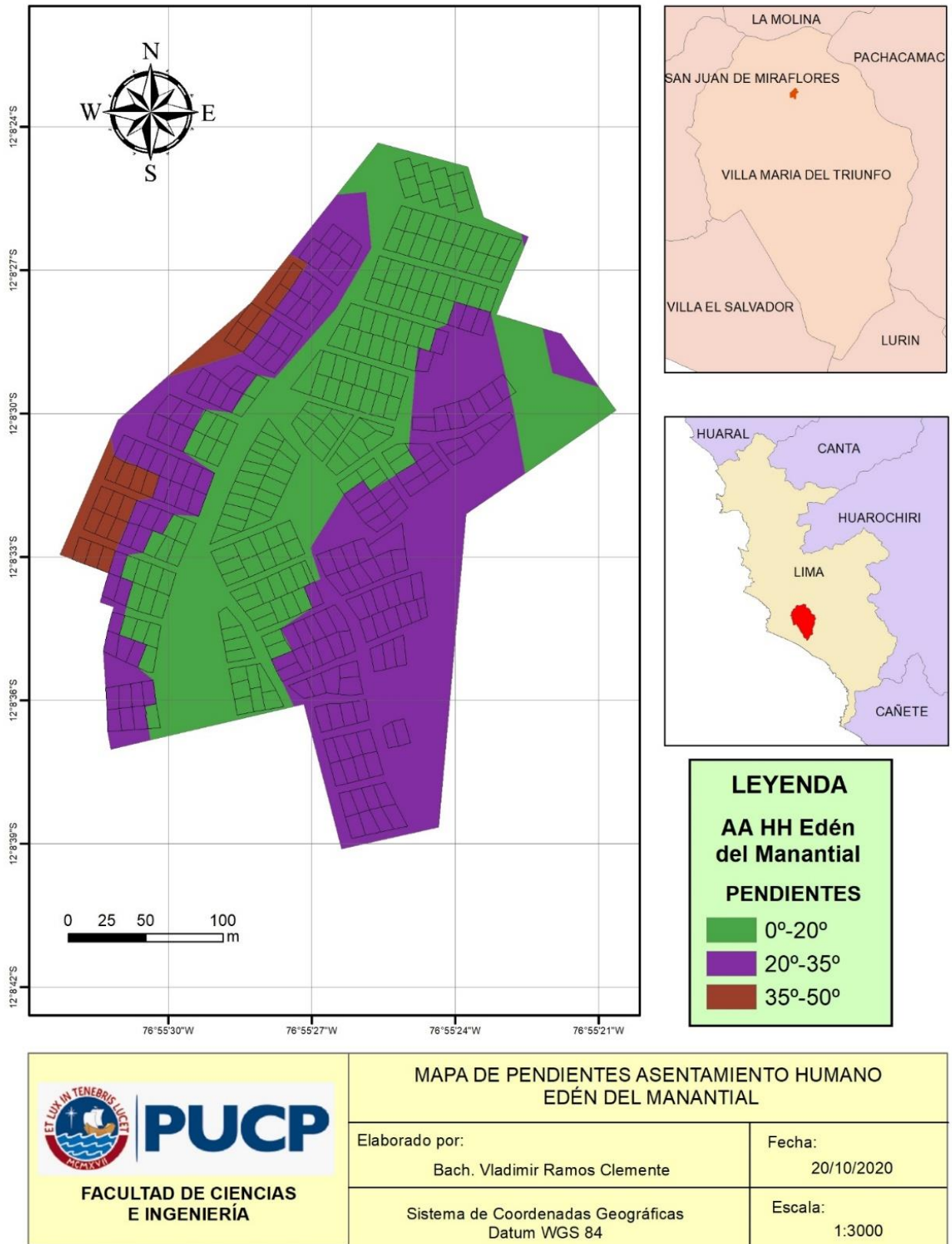


Figura 55. Mapa de pendientes del AAHH Edén del Manantial



De acuerdo con las recomendaciones de la Guía para habilitación urbana en asentamientos humanos de la Municipalidad Metropolitana de Lima (2013), mostradas en la Figura 56, se sugiere de manera práctica que  $\frac{2}{3}$  de largo del lote representarían parte del corte a realizar en la ladera y el  $\frac{1}{3}$  restante sería la zona en la cual se colocaría el relleno y la pirca. En ese sentido, a partir de relaciones geométricas y teniendo en cuenta estas consideraciones anteriores se estableció de manera aproximada la altura de pirca asociada a un rango de pendientes, la cual se muestra en la Tabla 17.

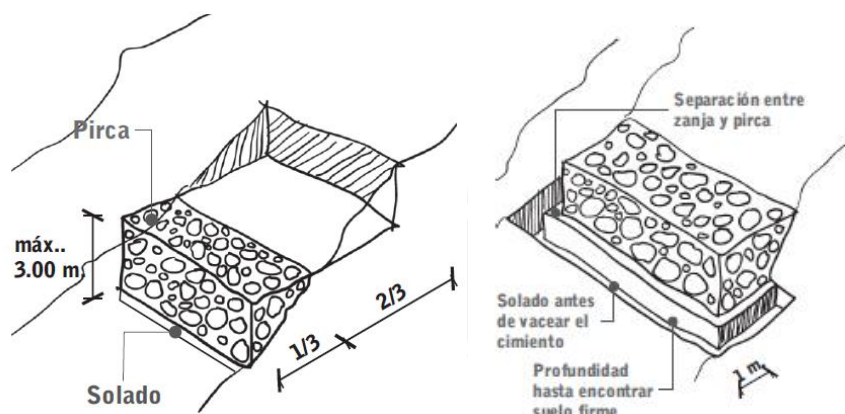


Figura 56. Perfil de la construcción de pircas (Corte y relleno). Fuente: MML (2013)

El proceso consistió en superponer el mapa de pendientes obtenido previamente con la información catastral proporcionada por el COFOPRI (Plataforma GEOLLAQTA). Con ello se obtuvo una estimación del número de viviendas hechas con pircas de 1m y 1.5m de altura. En ese sentido, para pendientes que van desde los  $20^\circ$  a  $35^\circ$  se asocian viviendas con pircas de 1m y para pendientes de  $35^\circ$  a  $50^\circ$  se asocian viviendas con pircas de 1.5m de altura. Es importante mencionar que esta toma de rangos implica una gran dispersión de los valores de la altura; sin embargo, para fines académicos de esta investigación se permite el uso y se recomienda posteriormente verificar en campo la precisión de esta metodología.

Tabla 17.

Pendientes asociadas a la altura de pircas

Denominación	Pendiente ( $^\circ$ )	Altura de Pirca (m)
Muy escarpada	$>50^\circ$	No se recomienda
Abrupta	$35^\circ-50^\circ$	Pircas de 1.5m
Fuerte	$20^\circ-35^\circ$	Pircas 1m
Moderada	$5-20^\circ$	No es necesario
Llana y/o suave	$<5^\circ$	No es necesario

Fuente: Adaptado de: Procedimiento Técnico de Análisis de Riesgo (2019)

En la Figura 57 se presenta un mapa temático con los sistemas estructurales de las viviendas del asentamiento humano Edén del Manantial, esta información se obtuvo y fue adaptado de los Censos Nacionales del 2017; asimismo, en la Figura 58 se presenta un mapa temático con los sistemas estructurales adaptados para el análisis, en el cual se consideran los sistemas vivienda-pirca de 1m y 1.5m de altura adaptados.

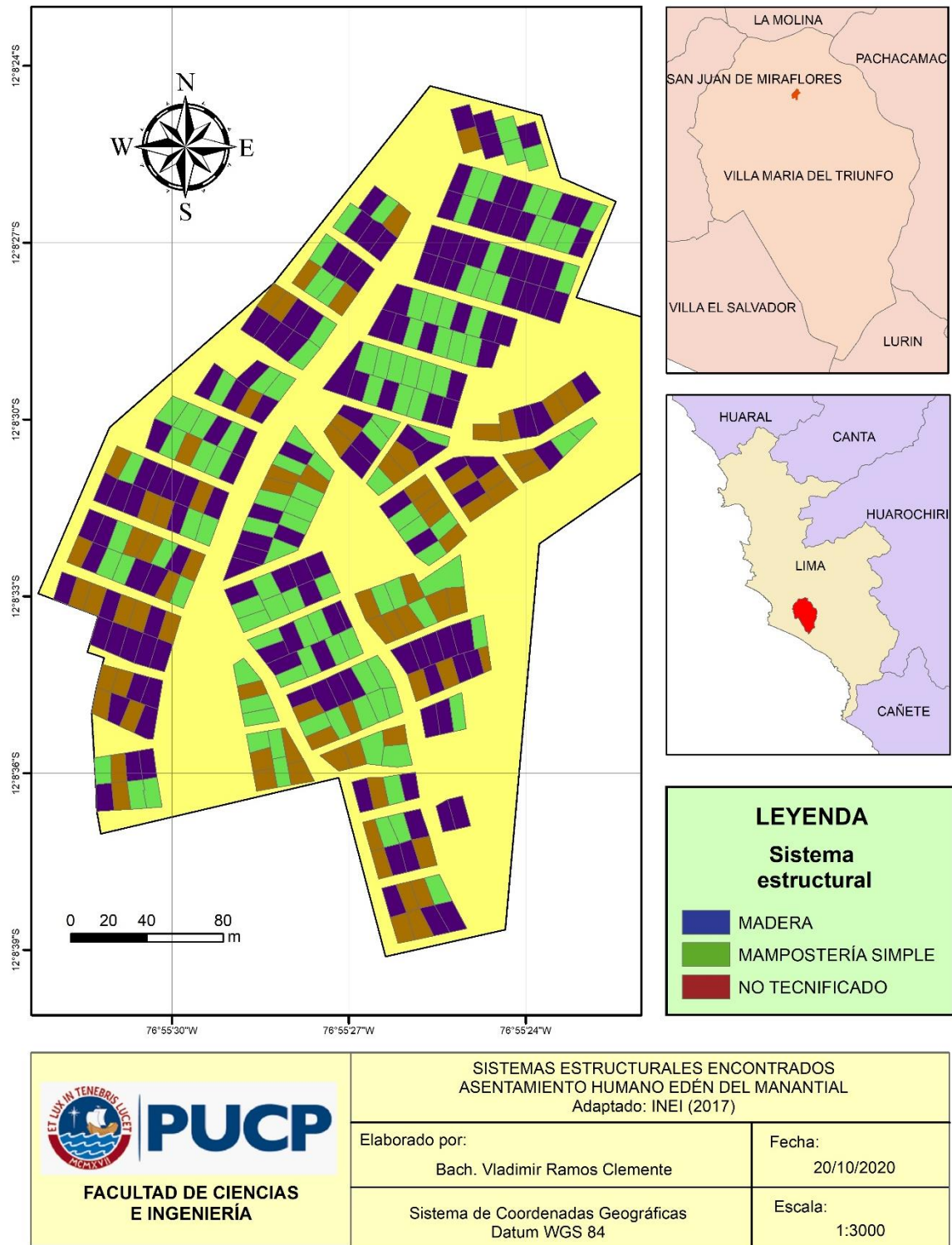
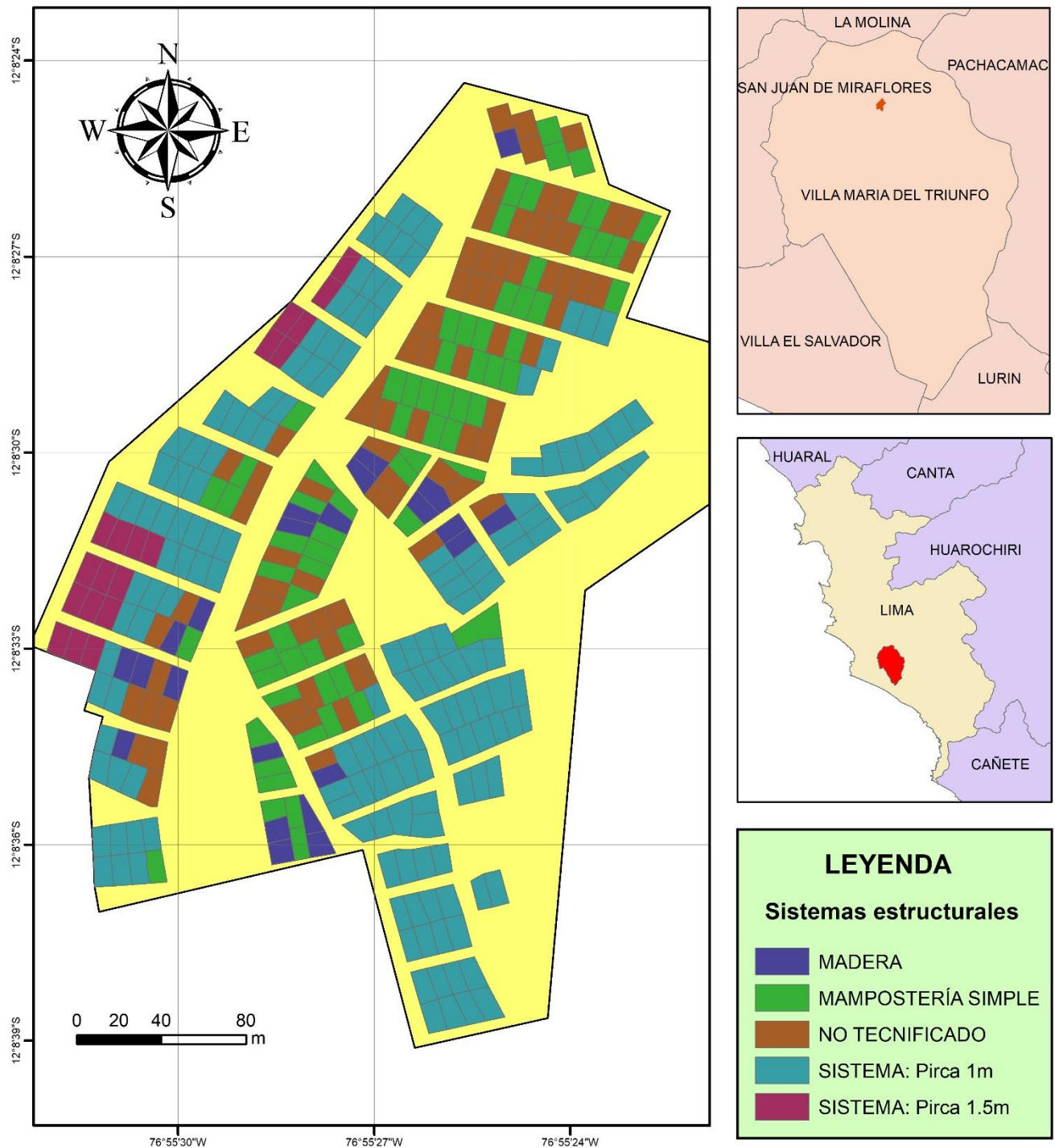


Figura 57. Sistemas estructurales en el Asentamiento Humano Edén del Manantial




 <b>FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA</b>	<b>SISTEMAS ESTRUCTURALES ADAPTADOS</b> <b>ASENTAMIENTO HUMANO EDÉN DEL MANANTIAL</b> Adaptado: COFOPRI	
	Elaborado por: Bach. Vladimir Ramos Clemente	Fecha: 20/10/2020
	Sistema de Coordenadas Geográficas Datum WGS 84	Escala: 1:3000

Figura 58. Mapa temático de los sistemas estructurales para la evaluación de riesgo sísmico

A partir de la información gráfica presentada, se observa en la Figura 58 una mayor cantidad de viviendas sobre pircas de 1m con respecto a las de 1.5m de altura esto debido a que las últimas se encuentran en pendientes más pronunciadas y de difícil acceso. En ese sentido, como se puede observar en ambos mapas la condición de una vivienda dependerá drásticamente de su ubicación: en ladera o terreno plano. Asimismo, su ubicación afectará también en el costo de reposición de cada lote debido a que las viviendas con un mismo sistema estructural ubicadas en laderas tendrán mayor costo de reposición en comparación con las viviendas que se encuentren en terreno plano a causa del costo adicional de la pirca.

#### **4.4.2 Costo de reposición**

El costo de reposición de los elementos expuestos (sistema vivienda-pirca y vivienda) se calculará con el costo por m<sup>2</sup> de la vivienda por el área techada y el costo por metro lineal de las pircas por la longitud de estas, esta última se considerará si es que se demuestre el caso. Es importante mencionar que se tomará en cuenta el sistema estructural de la vivienda y la altura de la pirca; asimismo, en nuestro análisis se tomará como área techada el 50% del área inscrita del predio o lote, información proporcionada en el mapa catastral del COFOPRI.

##### **4.4.2.1 Costo viviendas**

El costo de las viviendas se estimó mediante una tasación de acuerdo a las características presentes en la vivienda: material de construcción, acabados, servicios básicos entre otros. Para este proceso se utilizó el cuadro actual de valores unitarios oficiales de edificación para las localidades de Lima vigentes hasta octubre del 2020 proporcionada anualmente por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS); asimismo, estos valores unitarios propuestos son determinados por metro cuadrado de área techada.

En la Tabla 18 se muestra el costo total por m<sup>2</sup> de los 3 sistemas estructurales establecidos previamente para el análisis de riesgo, en la cual se aprecia claramente el costo menor de viviendas con material no tecnificado en comparación con los otros sistemas estructurales.

Tabla 18.

Costo por m<sup>2</sup> de área techada de vivienda

Sistema estructural	Costo por metro cuadrado de área techada (S/.)						
	Paredes	Techo	Piso	Ventanas y puertas	Baños	Servicio Sanitario	Total (s/.)
<b>Mampostería Simple</b>	226.51	21.75	24.07	53.09	12.42	32.22	370.06
<b>Madera</b>	116.14	21.75	24.07	28.68	8.54	32.22	231.40
<b>No tecnificado</b>	68.43	21.75	4.81	14.34	8.54	32.22	150.09

#### 4.4.2.2 Costo pircas

El costo de construcción de pircas fue obtenida considerando 3 partidas principales: relleno con material propio, habilitación de materiales y construcción del muro. En ese sentido, se realizó el análisis de precio unitario de la partida construcción de pircas por metro lineal. Para esto se utilizó el rendimiento promedio observado en la construcción de los 6 especímenes ensayados el cual se muestra en la Tabla 19. La cuadrilla presente en este proceso fue de 1 operario y 1 peón.

Tabla 19.

Rendimiento por tipo de pirca

Altura de muro	Cuadrilla	Tiempo de ejecución (días)	Rendimiento (ml/día)
<b>1m</b>	1 operario y 1 peón	1.5 días	2.7
<b>1.5m</b>	1 operario y 1 peón	2 días	2

A partir de estos resultados se puede observar que el rendimiento del muro tipo 2 (H=1.5m) es menor; en consecuencia, su costo total será mayor. En la Tabla 20 y 21 se muestra el resumen de cada una de las partidas consideradas para el cálculo donde se obtuvo un costo aproximado de la construcción de 1 metro lineal de pirca de 280 soles y 370 soles para los muros de 1m y 1.5m de altura respectivamente.

Tabla 20.

Precio por metro lineal de pirca de 1m

Partida	Unidad	Cantidad	PU (S/.)	Parcial (S/.)
<b>Muro tipo pirca h=1m</b>	ml	1	127.61	127.61
<b>Relleno con material propio seleccionado</b>	m <sup>3</sup>	1.5	30.65	45.98
<b>Habilitación de materiales (rocas)</b>	ml	1	105.25	105.25
			<b>TOTAL</b>	<b>278.84</b>



Tabla 21.

Precio por metro lineal de pirca de 1.5m

Partida	Unidad	Cantidad	PU (S/.)	Parcial (S/.)
Muro tipo pirca h=1m	ml	1	172.25	172.25
Relleno con material propio seleccionado	m <sup>3</sup>	3	30.65	91.96
Habilitación de materiales (rocas)	ml	1	105.25	105.25
			<b>TOTAL</b>	<b>369.46</b>

Finalmente, con el costo de reposición calculado para todos los elementos expuestos se completaría los datos necesarios para obtener la capa de exposición o el valor expuesto de toda la cartera de viviendas analizadas en la presente evaluación.

#### 4.5 EFECTOS DE SITIO: Efectos debido a la topografía

Para ingresar los efectos debido de la topografía se utilizó el software Efectos de Sitio V1.0 desarrollado por Gabriel Bernal. En la Figura 59 se muestra la interfaz del programa donde se asocia dos zonas: Zona 1 (color blanco) y Zona 2 (color rojo), esta clasificación de zonas se basó de acuerdo con el mapa de pendientes mostrado previamente. Por un lado, la Zona 1 está representado por el terreno con pendiente suave; en consecuencia, su factor de amplificación será de 1. Por otro lado, la Zona 2 está representado por las laderas de cerros y su factor de amplificación será de 1.4.

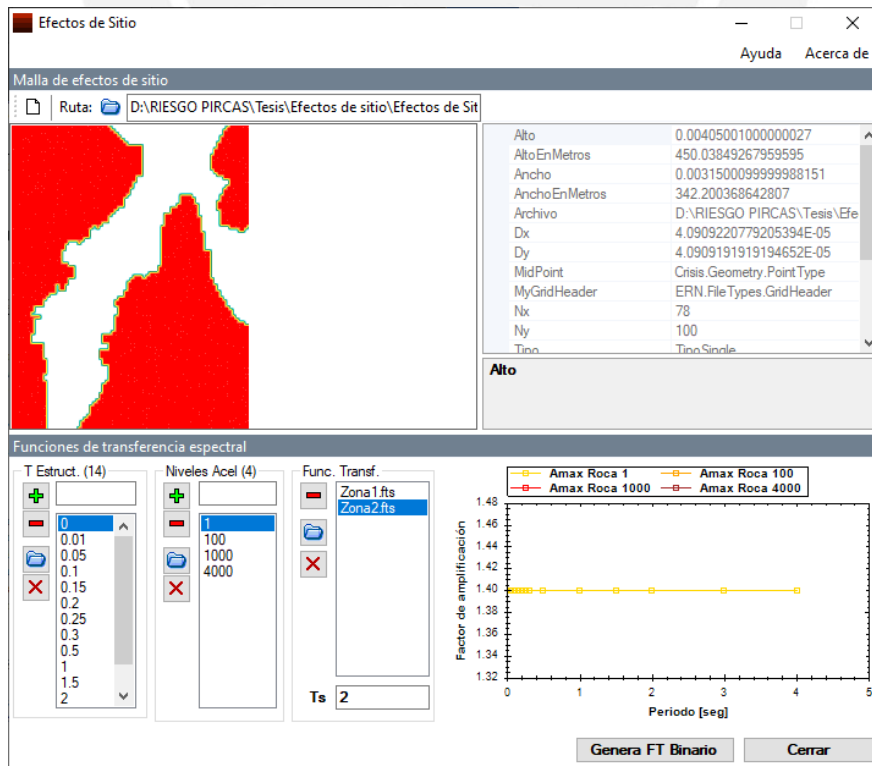


Figura 59. Efectos de sitio debido a la topografía



En ese sentido, la amplificación topográfica, factor de amplificación de 1.4, será introducida dentro el modelo creado en el software CAPRAGIS a través de una capa adicional cuya finalidad de esta capa será amplificar la intensidad del PGA en todas las viviendas ubicadas sobre laderas, específicamente los sistemas vivienda-pirca.

Es importante mencionar que dentro de los efectos de sitio, se encuentra la amplificación por el tipo de suelo, información brindada por estudios geotécnicos de microzonificación sísmica, lo cual no fue considerado en este análisis por falta de información y hubiese sido interesante contemplarlo especialmente en los terrenos que no están sobre laderas.

#### 4.6 RESULTADOS

La evaluación de riesgo sísmico se realizó mediante el software CAPRAGIS v2.4 para lo cual se utilizó la información obtenida previamente: peligro, vulnerabilidad, exposición y efectos de sitio. Este software permite el ingreso de dicha información mediante capas para generar un análisis probabilístico que considerará una gran cantidad de eventos y/o escenarios relacionados con el archivo de peligro sísmico; asimismo, se puede analizar un escenario en específico para poder estimar las pérdidas probables ante ese evento en particular. En la presente sección se presentarán los resultados de ambos análisis de riesgo: probabilístico y determinístico.

En la Figura 60 se muestra las 3 capas subidas dentro del programa, en la cual se puede observar la capa de exposición, peligro y efectos de sitio; asimismo, se observa que las laderas se encuentran afectadas y amplificadas por el efecto topográfico determinado.

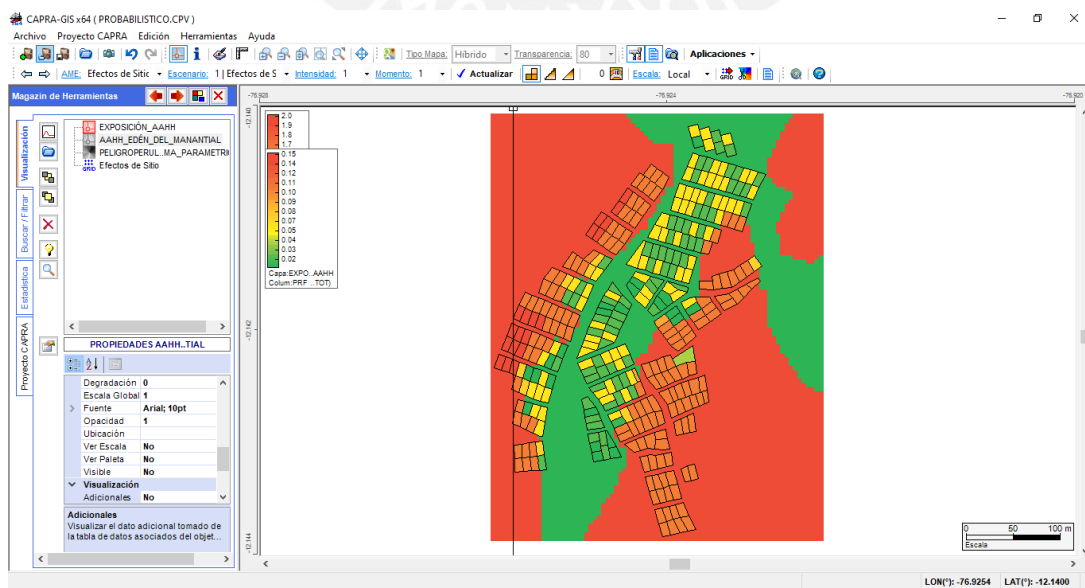


Figura 60. Plataforma CAPRAGIS v.2.4.0

#### 4.6.1 Análisis Probabilístico

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación probabilística del riesgo sísmico. En la Figura 61 se muestra los valores obtenidos en el software CAPRAGIS, en la cual el PF\_T1(TOT) representa la pérdida anual esperada en unidades monetarias y el PRF\_T1(TOT) representa la pérdida anual esperada relativa al valor expuesto cuyo valor para el sistema vivienda pirca de 1.5m de altura (PIR2) resultó ser alrededor del 15% del valor expuesto.

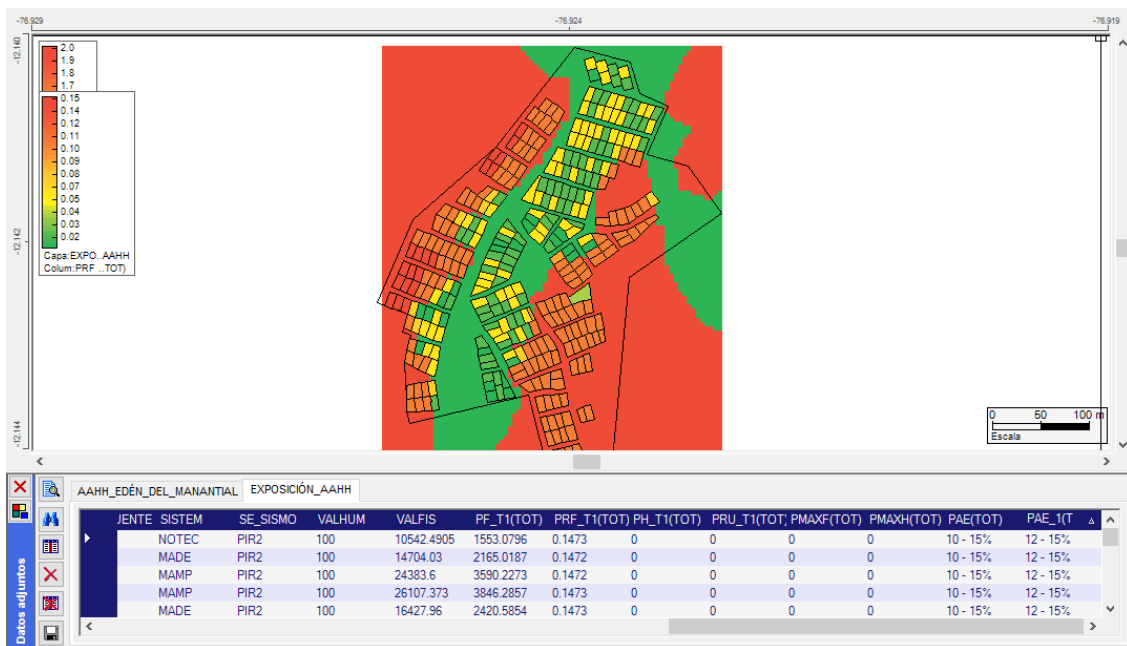


Figura 61. Resultados de la evaluación de riesgo sísmico: Plataforma CAPRAGIS

A continuación se muestran los resultados de las métricas de riesgo obtenidas a partir de la evaluación de riesgo realizado: pérdidas anuales esperadas relativas (PAE) y pérdidas máximas probables (PML); asimismo, se mostrarán mapas de riesgo sísmico de la zona evaluada. Posteriormente se discutirán los resultados.

##### 4.6.1.1 Resultados de Pérdidas Anuales Esperadas (PAE)

En la Tabla 22 se muestra la PAE total acumulada de la cartera de viviendas, la cual es alrededor de 7.4% del valor expuesto. Este valor relativamente alto se debe a la gran incertidumbre y vulnerabilidad de los sistemas vivienda-pirca, los cuales incrementan e influyen en gran medida la PAE de la cartera de viviendas; asimismo, de forma teórica el seguro asociado a estos elementos expuestos no sería para nada competitivo debido al alto riesgo presente. Por consiguiente, se deberían tomar medidas y acciones para reducir el riesgo enfocadas en primera instancia en las viviendas sobre laderas.

Tabla 22.

*Pérdida Anual Esperada relativa de la cartera de viviendas*

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Nro de viviendas</b>	312
<b>Valor expuesto</b>	S/5,326,280.00
<b>PAE (S/.)</b>	S/393,968.56
<b>PAE (%)</b>	7.4%

De la misma manera, en la Tabla 23 se muestra la PAE obtenida para cada sistema estructural. Se aprecia el alto valor de la PAE en las viviendas sobre pircas, esto ocasionado por la amplificación sísmica debido al efecto topográfico y por su alta vulnerabilidad estructural; asimismo, el sistema estructural de madera presenta un PAE de 1.2% valor relativamente pequeño en comparación con los demás sistemas estructurales, lo cual se debe al peso ligero y/o liviano de estos materiales.

Tabla 23.

*Pérdidas anuales esperadas (PAE) por sistema estructural*

<b>Sistema Estructural</b>	<b>PAE (%)</b>
<b>Madera</b>	1.2%
<b>Mampostería Simple</b>	2.7%
<b>No Tecnificado</b>	6.3%
<b>V. sobre Pirca H=1m</b>	10.8%
<b>V. sobre Pirca H=1.5m</b>	14.7%

En la Figura 62 se muestra un gráfico de barras con los valores de la PAE para cada sistema estructural considerado en el análisis.

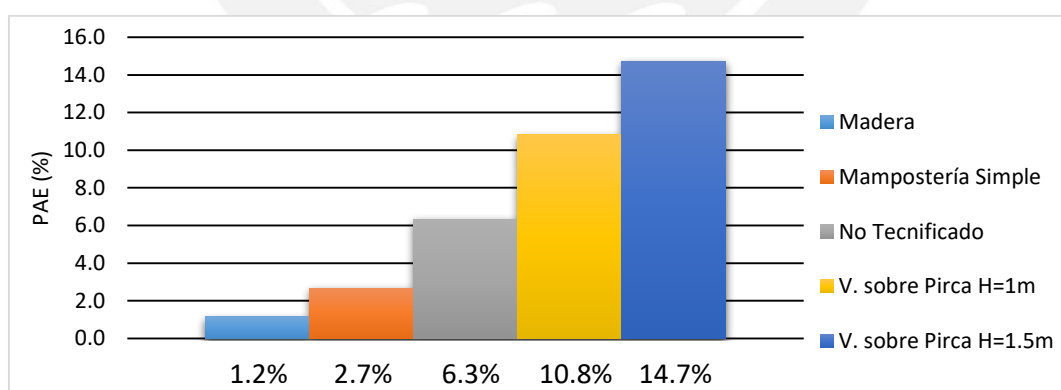
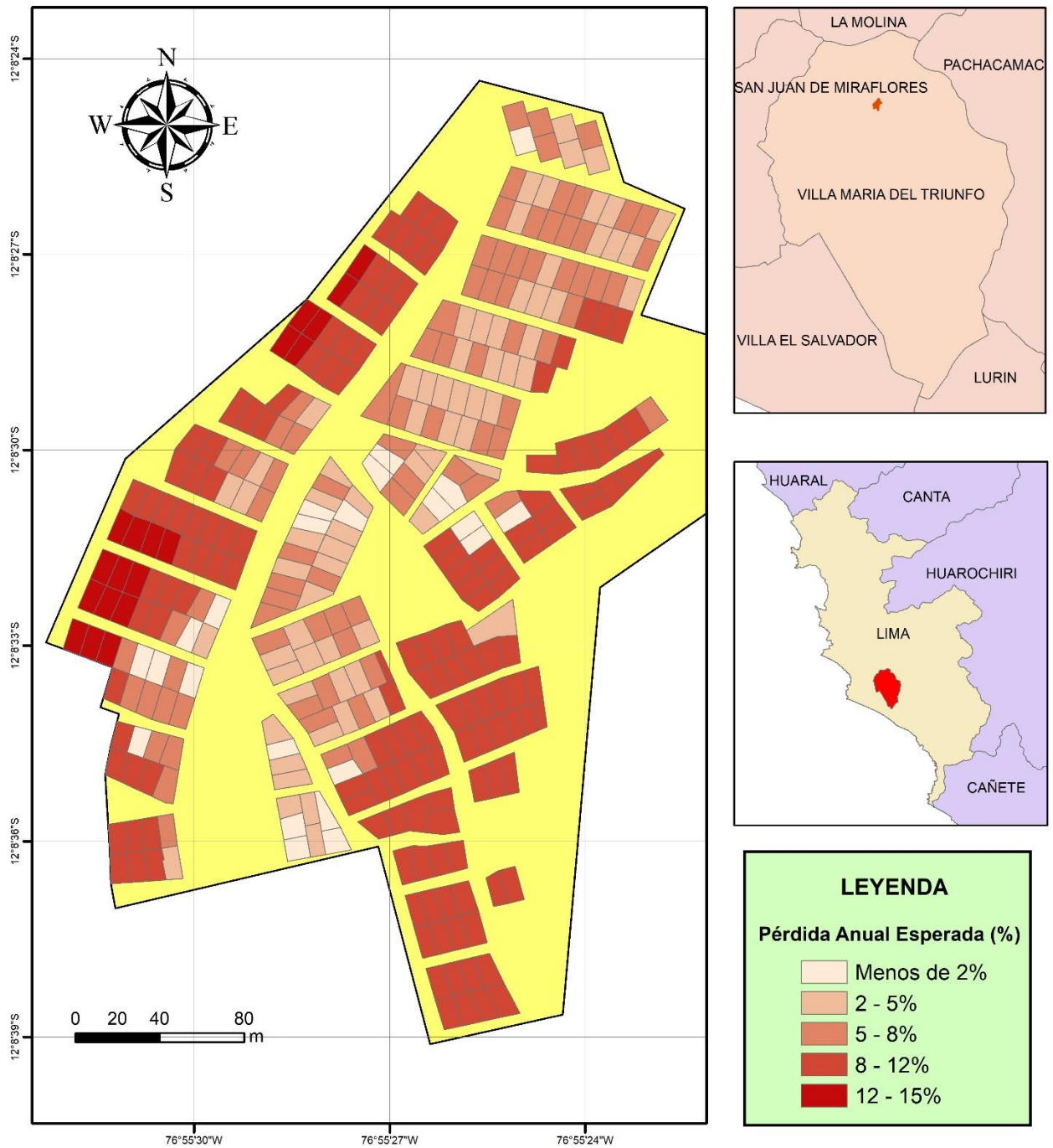


Figura 62. *Pérdida Anual Esperada (PAE) por sistema estructural*

A partir de estos resultados se procede a construir el mapa de riesgo sísmico mostrado en la Figura 63, en el cual se identifica que las viviendas sobre pircas de 1m y 1.5m de altura son las más afectadas y presentan PAE altas del 8% al 15% del valor expuesto en comparación con las viviendas en la parte central. En ese sentido, este resultado permite focalizar las acciones de prevención y mitigación a las viviendas sobre laderas.




 <p><b>FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA</b></p>	<b>EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL RIESGO SÍSMICO DE VIVENDAS DEL ASENTAMIENTO HUMANO EDÉN DEL MANANTIAL PLATAFORMA CAPRAGIS</b>	
	Elaborado por: Bach. Vladimir Ramos Clemente	Fecha: 20/10/2020
	Sistema de Coordenadas Geográficas Datum WGS 84	Escala: 1:3000

Figura 63. Mapa de riesgo sísmico del asentamiento humano Edén del Manantial

#### 4.6.1.2 Resultados de Pérdidas Máximas Probables (PML)

En la Tabla 24 se muestra las pérdidas en porcentaje del valor expuesto y las pérdidas monetarias de cada una de estas asociadas a cierto periodo de retorno. A modo de ejemplo para un periodo de retorno de 75 años (Sismo Ocasional) se asocian pérdidas esperadas del 41% del valor expuesto total.

Tabla 24.

Pérdidas probables por periodo de retorno

Tr (años)	PML (%)	PML (S/.)
45	34%	S/1,830,351
75	41%	S/2,185,532
100	45%	S/2,381,452
200	53%	S/2,822,282
475	62%	S/3,285,439

En la Figura 64 se muestra la gráfica del PML asociada a cierto periodo de retorno. A partir de esta se puede concluir que la cartera es muy riesgosa y/o vulnerable, lo cual se explica que para un periodo de retorno de 100 ya se tenga pérdidas esperadas de alrededor del 45%.

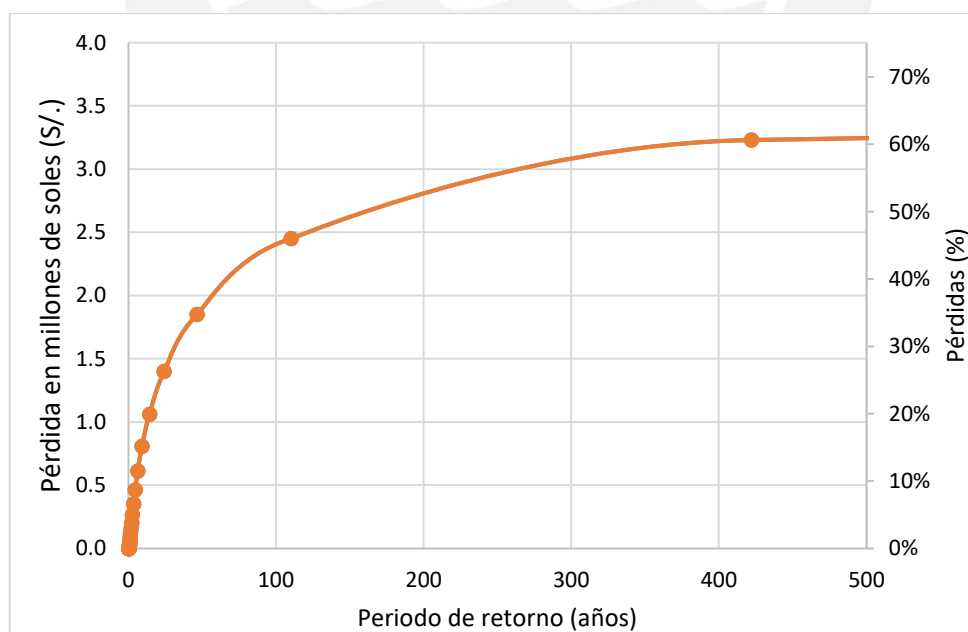


Figura 64. Pérdidas Máximas Probables (PML)

#### 4.6.2 Análisis Determinístico: Sismo Frecuente

En la presente sección se mostrará las Pérdidas Esperadas por Escenario (ESL, por sus siglas en inglés) para un evento que genere valores de aceleración máxima del terreno (PGA) de alrededor 185 gal en la zona de estudio: AAHH Edén del Manantial. Existe una gran cantidad de escenarios que generarían dicho valor de aceleración en PGA debido a que esta depende de la magnitud del evento y su distancia con respecto a la zona de análisis.

En ese sentido, se escogió el escenario N° 2700 de magnitud 8.3 Mw, generado en la Fuente N° 4, cuya huella de isoaceleraciones máximas del terreno se muestra en la Figura 65. Este escenario presenta una gran liberación de energía; sin embargo, se debe tener en cuenta que en las costas de la ciudad de Lima se esperan eventos sísmicos de mayor magnitud, cercanos a 8.8 Mw (Yauri, 2017).

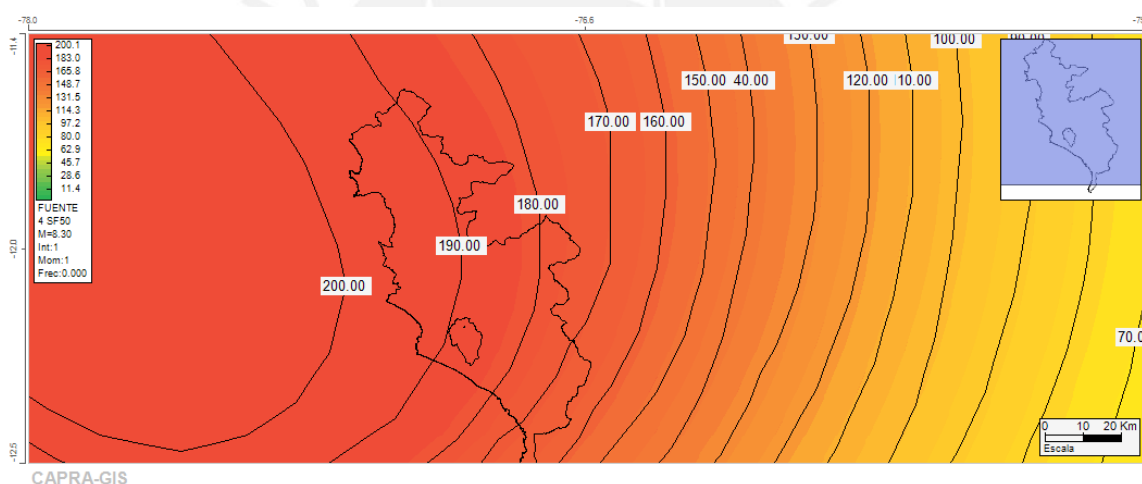


Figura 65. Isoaceleraciones para escenario N° 2700. Sismo frecuente

A partir de figura previa, se puede indicar de manera práctica que la zona de análisis, al tratarse de una zona relativamente pequeña, recibirá un solo valor de aceleración en PGA. En ese sentido, el valor de PGA en la zona de estudio será de aproximadamente 186 gal, el cual es asociado a un sismo frecuente de acuerdo al estudio de peligro sísmico realizado. Identificado el escenario sísmico se procedió a evaluar el modelo construido en la plataforma CAPRAGIS para este único escenario.

En la Figura 66 se muestran las pérdidas esperadas generadas por el escenario N° 2700 para la cartera de viviendas del AAHH Edén del Manantial, en el cual se identifica que los sistemas vivienda pirca (PIR1 y PIR2) sufrirán las mayores pérdidas con respecto a su valor expuesto: entre el 70% al 100% de daño.



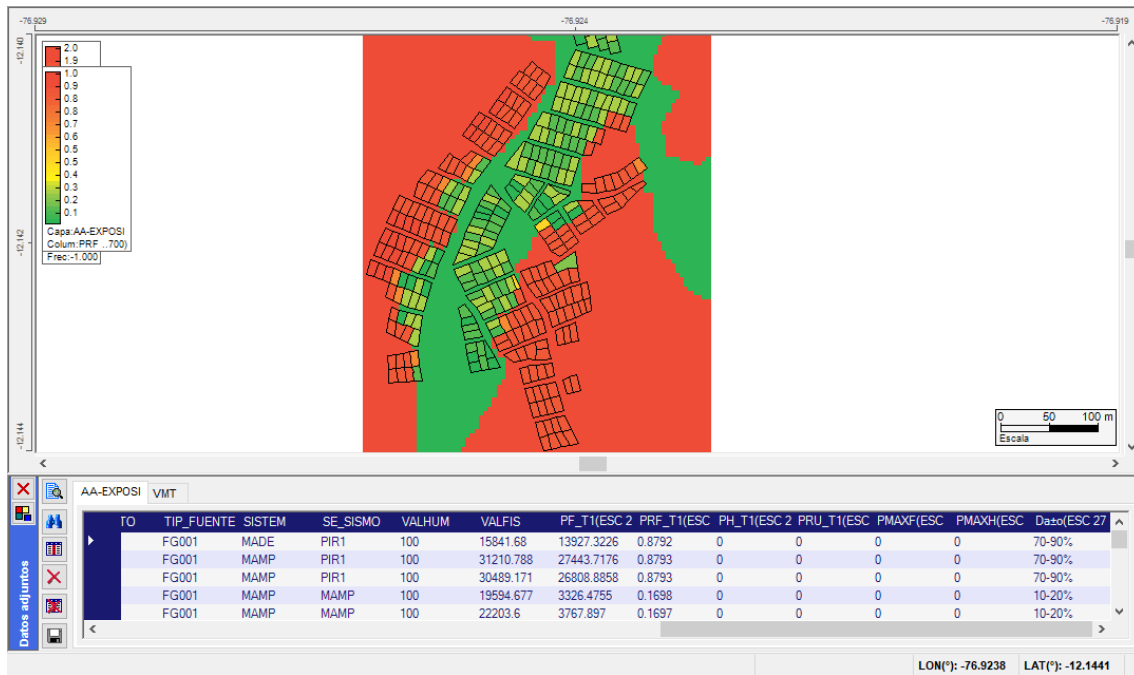


Figura 66. Resultados de la evaluación de riesgo sísmico: Plataforma CAPRAGIS

En la Tabla 25 se resumen las pérdidas obtenidas ante este escenario sísmico, donde se espera cerca del 55% de pérdidas esperadas totales con respecto al valor expuesto. Esto considerando la probabilidad de ocurrencia de sismos de mayor magnitud acrecienta el riesgo latente de estos asentamientos humanos.

Tabla 25.

*Pérdida Anual Esperada relativa de la cartera de viviendas*

Característica	Valor
Nro de viviendas	312
Valor expuesto	S/5,326,280.00
Pérdidas esperadas (S/.)	S/2,929,620.00
Pérdidas esperadas (%)	55%

En la Figura 67 se presenta el mapa de riesgo sísmico ocasionado por el escenario en estudio, en el cual se puede observar que las viviendas ubicadas en laderas son las más afectadas en este proceso debido a 2 factores fundamentales: la amplificación de las intensidades (efecto topográfico) y la alta vulnerabilidad de los sistemas vivienda-pirca. Por otro lado, es de suma importancia mencionar que la falla de estos sistemas en laderas afectaría en gran medida a las viviendas ubicadas en las zonas bajas debido a que sus bloques se desprenderían generando así un efecto desencadenado.

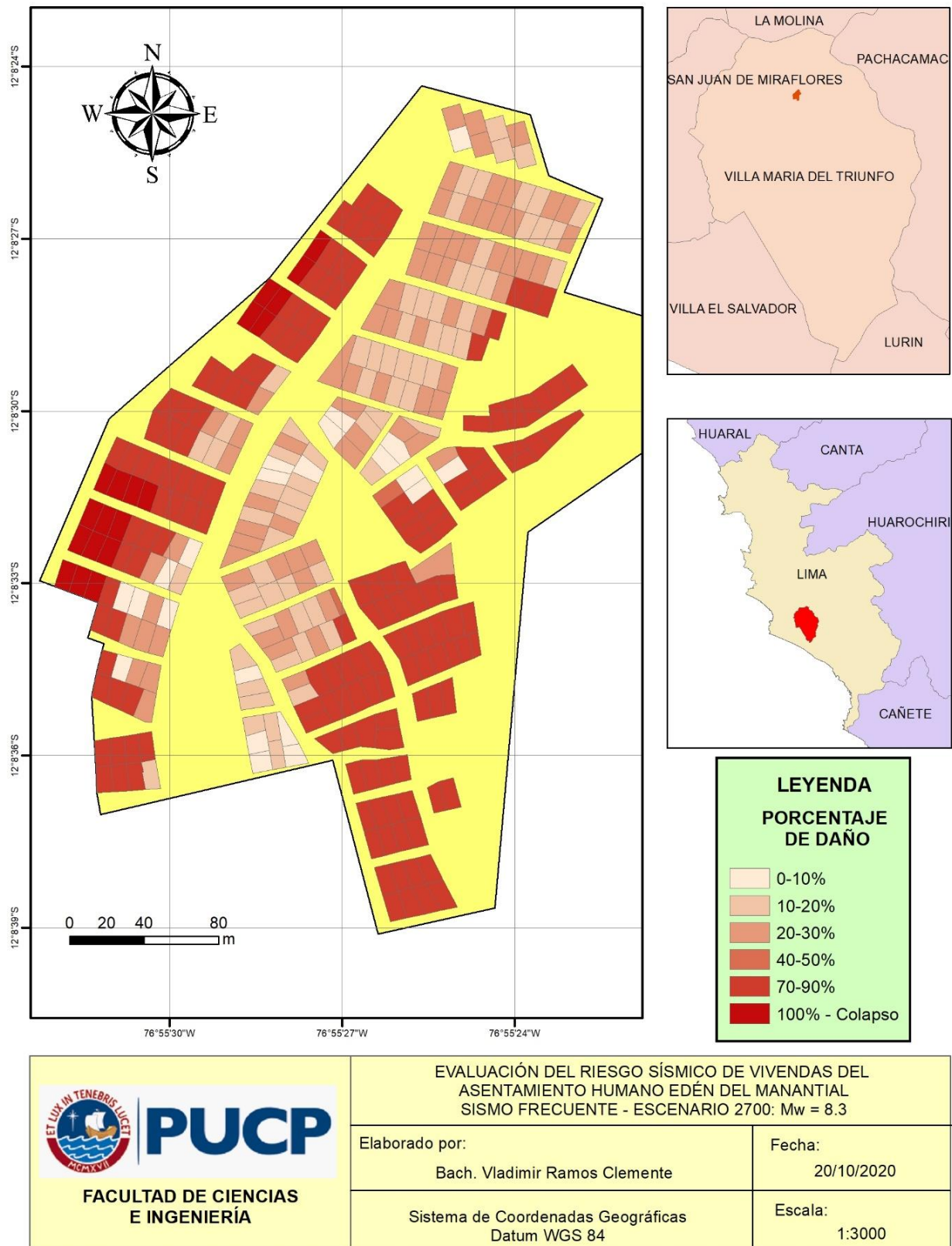


Figura 67. Escenario 2700: Sismo frecuente ( $T_r = 45$  años)

## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se analizarán los resultados obtenidos en cada uno de los pasos para realizar la evaluación del riesgo sísmico en el Asentamiento Humano Edén del Manantial: proceso constructivo de pircas, estimación del peligro sísmico, construcción de las curvas de vulnerabilidad de los sistemas analizados, la exposición de los elementos encontrados y los resultados de las métricas y mapas de riesgo. Asimismo, se mencionan y/o determinan las limitaciones encontradas en el proceso de esta investigación.

### 5.1 Proceso constructivo de pircas

Es importante mencionar que el proceso constructivo y la técnica utilizada en el reporte mostrado dependerán de varios factores, entre ellos la zona donde se realice la construcción, las propiedades del material empleado y la mano de obra. En ese sentido, el proceso reportado no necesariamente implica el proceso constructivo de pircas en toda la provincia de Lima, por el mismo hecho que estas estructuras no poseen alguna reglamentación o normativa para su construcción.



(a) (b)  
*Figura 68. (a) Pirca con piedras redondeadas (b) Pirca con piedras angulosas*

En esa misma línea, la Figura 68 muestra pircas con diferentes acabados finales, las cuales están acondicionadas de acuerdo al tipo de material utilizado en la zona, rocas redondeadas (a) y rocas angulares (b), lo cual demuestra y confirma la variabilidad de estas estructuras en su diseño y comportamiento. Por consiguiente, esta investigación no pretende avalar o garantizar el proceso constructivo de pircas reportado.

Del mismo modo, a partir del procedimiento mostrado es importante mencionar que la técnica empleada por los maestros pirqueros no se realizó de manera tecnicada sino de

forma experimental e improvisada, lo cual implica un alto riesgo de estas construcciones debido a las incertidumbres presentes en su construcción. Asimismo, se identificó el empleo de piedras de unión conocidas como *through stones*. No obstante, su uso es escaso para cumplir su función específica de unión y enlace entre las caras del muro.

Entre las observaciones puntuales encontradas en el proceso constructivo se pueden mencionar las siguientes:

- Se observó que los maestros pirqueros no utilizaban instrumentos para verificar la verticalidad del muro, lo cual genera incertidumbre en la estabilidad del mismo. herramientas manuales y la pericia de los maestros pirqueros.
- La técnica utilizada fue aprendida, asimilada y desarrollada de manera empírica, con ciertos rasgos y aportes de culturas antiguas como la incaica.
- Se verificó y constató que los maestros pirqueros no tienen establecido un procedimiento técnico único, ya que para la construcción de los diversos muros no existía un patron único utilizado sino dependía del avance de la estructura y la disponibilidad de las piedras.
- La investigación realizada no puede extrapolarse a todas las construcciones de pircas en otras condiciones, ya que el material utilizado (piedras y rocas) depende de la zona donde se construirá la pircas.
- La construcción de los muros se realizó de manera continua, es decir se construía y al finalizar se ensayaba el muro. Cabe resaltar, que los materiales empleados se reutilizaban para todos los ensayos.

Asimismo, a partir de la experiencia registrada se recomienda lo siguiente:

- Mejorar el proceso constructivo mediante el empleo de instrumentos de medición y/o verificación, por ejemplo, plomada y nivel. Este procedimiento servirá para verificar la verticalidad del muro y con ello una mejor estabilidad de este.
- Analizar una mayor cantidad de ensayos con medidas distintas tanto en ancho, altura y largo. Con la finalidad de obtener datos con mayor confiabilidad y representación.
- Verificar el proceso de habilitación del terreno insitu, para poder complementar los pasos del proceso constructivo completo de pircas.

En síntesis, a partir de los ensayos experimentales realizados a los 6 especímenes se demostró la alta fragilidad de estas estructuras. Por ende, se recomienda mejorar su proceso constructivo mediante la verificación de la verticalidad y la utilización de un proceso más tecnificado; como por ejemplo, la literatura recomienda el uso continuo y uniforme de piedras de enlace y amarre conocidas como *through stones*; asimismo, se recomienda el uso de *coping stones* en la parte final del muro (McCombie et al., 2015). En ese sentido, se sugiere realizar capacitaciones a los maestros pirqueros con la finalidad de mejorar su técnica debido a que actualmente esta presenta deficiencias respecto a la práctica internacional.

## **5.2 Porcentaje de vacíos**

A partir de los ensayos realizados replicando la técnica de los maestros pirqueros, se obtuvo valores altos del porcentaje de vacíos de alrededor 32% a 38% en las pircas, en comparación con el porcentaje de vacíos del 15% considerado en la tesis de Zanelli (2019). Este nuevo valor implica un menor peso de los muros y a su vez mayor inestabilidad ante sollicitaciones externas como sismos o sobrecargas.

De acuerdo con Colas et al. (2013), el porcentaje de vacíos para muros compuestos por rocas largas es de 15% y compuestos por rocas pequeñas de 25%. En consecuencia, nuestras pircas presentan porcentajes elevados que se deberían principalmente a la técnica utilizada en su construcción y la distribución de los bloques de piedra. Por lo tanto, sería recomendable reducir el porcentaje de vacíos de las pircas con el objetivo de aumentar su peso, asimismo, esto mejoraría su estabilidad frente a reajustes entre bloque y bloque debido a la acción de sollicitaciones externas, como las generadas por sismos.

## **5.3 Peligro sísmico**

Para el presente análisis se utilizó el modelo del IGP (2014), el cual considera datos sísmicos a partir de 1960 al 2012; asimismo, este modelo sirvió para la actual Norma Técnica E0.30 Diseño Sismorresistente. Sin embargo, es necesario poder actualizar los catálogos utilizados debido a que hasta la fecha ocurrieron sismos de gran magnitud que podrían afectar directamente en los parámetros sísmológicos del modelo, tales como el terremoto ocurrido en Loreto el año 2019 con una magnitud 8.0 Mw, el cual no estaría contemplado dentro de los parámetros del modelo.

### 5.3.1 Aceleración máxima del terreno (PGA)

En la Tabla 26 se muestra la comparación de los valores de PGA obtenidos en esta investigación con los propuestos en la plataforma en línea SENCICO, en la cual se observa que los valores resultantes son bastante similares. Sin embargo, existen algunas diferencias considerables para sismos de diseño con periodos de retorno 475 y 975 años respectivamente, las cuales se deben a un menor número de fuentes sismogénicas y el uso de mayor cantidad de GMPE en el modelo propuesto por SENCICO.

Tabla 26.

Comparación del PGA obtenido en la investigación con el proporcionado por el SENCICO

Sismo de diseño	Tr (años)	Investigación (g)	SENCICO (g)	% Error
<b>Frecuente</b>	45	0.19	0.19	0.5%
<b>Ocasional</b>	75	0.23	0.23	1.8%
<b>Raro</b>	475	0.42	0.48	12.4%
<b>Muy raro</b>	970	0.52	0.61	13.9%

En esa misma línea, la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente indica que la ciudad de Lima y en consecuencia nuestra zona de análisis se encuentra en la zona sísmica 4, con un factor de zona de 0.45g para un tiempo de retorno de 475 años. Ahora bien, a partir del análisis de peligro sísmico realizado en la zona el valor de PGA encontrada fue de 0.42g, lo cual verifica los requerimientos oportunos de la norma actual en esta parte de la ciudad.

### 5.3.2 Aceleración máxima del terreno en ladera (PGA\*)

A partir de los resultados obtenidos se identificó que la amplificación del PGA debido a la topografía resulta ser un parámetro con alta incidencia en el análisis de riesgo sísmico debido a que el peligro se incrementa considerablemente en las zonas afectadas (laderas). Para este estudio el factor determinado fue de  $S_T = 1.4$ , el cual solo dependía de la pendiente y altura del talud. Este factor se encuentra dentro del rango de valores de amplificación sísmica en taludes recomendados por el Eurocódigo 8; asimismo, representa un valor cercano al propuesto en la investigación de Zanelli (2019), donde se utilizó un factor de amplificación de 1.2 en una ladera en Carabayllo.

En este análisis se consideró un único factor de amplificación en todas las laderas identificadas, el cual fue obtenido utilizando la pendiente promedio del talud. No



obstante, se recomienda realizar análisis más específicos e integrales que consideren la amplificación sísmica de manera local, como por ejemplo, considerar diferentes factores de amplificación, los cuales estén asociados a determinados rangos de pendiente.

#### **5.4 Vulnerabilidad sísmica**

Las curvas de daño esperado de los sistemas estructurales considerados en este análisis fueron obtenidos a partir de estudios previos en países de América Central: Honduras, Guatemala y El Salvador, los cuales presentan tipologías similares a las construcciones típicas encontradas en el Perú. Sin embargo, sería importante y beneficioso obtener curvas de vulnerabilidad propias del Perú, que brinden información requerida para la evaluación de riesgo y representen las características y el comportamiento real de las viviendas analizadas. En ese sentido, se recomienda realizar investigaciones de vulnerabilidad enfocadas en viviendas precarias e informales en el Perú y en específico de la ciudad de Lima, uno de los departamentos con mayor riesgo sísmico. A modo de ejemplo, es necesario realizar estudios de la vulnerabilidad del sistema no tecnificado, el cual presenta gran incertidumbre debido a que los materiales utilizados son muy variados y precarios.

##### **5.4.1 Curvas de fragilidad**

El proceso de obtención de las curvas de fragilidad se realizó de manera experimental para lo cual se utilizó los resultados obtenidos en cada uno de los 6 especímenes ensayados en el proyecto N° 109-2017 - FONDECYT: ángulo de colapso, derivas y aceleración de colapso. En ese sentido, cada tipología de pirca obtuvo solo 3 puntos de análisis; asimismo, este proceso consideró un solo estado de daño (daño de colapso) para la construcción de curvas de fragilidad debido a que no se logró determinar un patrón de daño intermedio y las fallas fueron frágiles y/o súbitas. Por lo tanto, se recomienda la realización de una mayor cantidad de ensayos con el objetivo de disminuir la incertidumbre y mejorar la confiabilidad en los resultados; además de identificar algún estado daño intermedio que permita un estudio más detallado.

##### **5.4.2 Curvas de daño esperado**

Para la obtención de la curva de vulnerabilidad del sistema vivienda-pirca se consideró la envolvente obtenida a partir de superponer la curva de vulnerabilidad del sistema estructural utilizado con la curva de vulnerabilidad experimental de la pirca, en la cual se observó que la vulnerabilidad de las pircas es la que gobierna en todos los casos. Sin

embargo, es importante tener en cuenta el caso del sistema estructural no tecnificado para el cual si existe daño esperado considerable para valores de intensidad (PGA) pequeños.

Las funciones de vulnerabilidad para los sistemas de vivienda pirca de 1m y 1.5m de altura obtenidas en la investigación realizada por Zanelli (2019) presentan menor vulnerabilidad en comparación con los resultados experimentales (Figura 50). Por lo cual, estas funciones de vulnerabilidad analíticas, obtenidas mediante un modelo en elementos discretos, no representarían el comportamiento real de estas estructuras; en consecuencia, se recomienda calibrar dicho modelo con una mayor cantidad de ensayos experimentales, tales como los realizados en esta investigación debido a que la técnica utilizada en nuestro país es distinta y particular a la práctica internacional con la cual se calibró dicho modelo.

### **5.5 Exposición**

Los costos de reposición se realizaron en base a una tasación mediante la obtención de los costos unitarios por metro cuadrado proporcionados por el MVCS. Sin embargo, se tuvo en cuenta que todas las viviendas analizadas eran de un solo piso, con lo cual no se consideraron viviendas de 2 o más pisos. En ese sentido, el paso siguiente para esta investigación implicaría realizar visitas de campo al lugar de análisis y verificar dichas características mediante un inventario para toda la cartera de viviendas; asimismo, es necesario verificar la efectividad de la asunción realizada entre el rango de pendientes del talud y la altura de la pirca. Por otro lado, el mapa de pendientes podría mejorarse mediante la aplicación de nuevos métodos tecnológicos, tales como levantamiento topográfico mediante “drones”, con el objetivo de obtener una mejor resolución, precisión y detalle en los resultados.

Asimismo, se obtuvo información del material de construcción de las viviendas a nivel de manzanas, lo cual fue asignado a cada lote de manera aleatoria teniendo en cuenta el porcentaje total por manzana. En ese sentido, se recomienda emplear en futuras investigaciones información catastral a nivel de lote actualizada, el cual permita conocer el estado actual de los elementos expuestos; de la misma manera, las evaluaciones de riesgo se realizan para un tiempo en específico debido a que el proceso es cambiante y dinámico. Actualmente, el desarrollo de información catastral en todo el Perú está a cargo del COFOPRI; sin embargo, su implementación es aún incompleta debido a que existe una gran cantidad asentamientos humanos que no presentan información catastral actualizada o en todo caso no existe información o registros.

### **Futuras líneas de investigación:**

Actualmente, dentro de la evaluación de riesgo de desastres naturales existe una serie de herramientas que pueden sistematizar el procedimiento de obtención de información de la capa de exposición en una área determinada, tales como el *Machine Learning* asociado comúnmente con la Inteligencia Artificial (GFDRR, 2018). La aplicación de estas innovadoras herramientas implicaría una gran reducción en términos monetarios y de tiempo debido a que los procedimientos tradicionales requieren de un gran desplazamiento de recursos, entre ellos la gran cantidad de encuestadores requeridos para verificar el estado de las estructuras y el procesamiento de dichos datos recopilados. En ese sentido, se debe fomentar la investigación en este campo para lograr así un procedimiento mucho más eficiente y realista. En esa línea, se podrían desarrollar algoritmos que permitan identificar cierta información necesaria de vulnerabilidad y exposición de las viviendas en base a imágenes satelitales e imágenes 360° de la internet, tales como el sistema estructural, número de pisos, ubicación e incluso reconocer si la vivienda presenta ciertos elementos específicos como pircas o muros de contención en caso de que estas se encuentren sobre laderas. En consecuencia, estos procedimientos lograrían reducir el tiempo y el costo de la información necesaria para realizar evaluaciones de riesgo sísmico a gran escala o en situaciones en las que no sea posible enviar encuestadores, como por ejemplo, en situaciones de cuarentena por pandemias.

### **5.6 Evaluación de riesgo sísmico**

De acuerdo con investigaciones y reportes del IGP y del INDECI (2017) se espera la ocurrencia de terremotos de gran magnitud del orden del 8.8 Mw e incluso 9.0 Mw frente a las costas de la ciudad de Lima, lo cual se explica por el silencio sísmico en la costa central del Perú. En ese sentido, la ocurrencia de algún evento con dicha magnitud generaría una situación catastrófica en gran parte de la ciudad debido a la alta vulnerabilidad e informalidad de las construcciones, las cuales son generalmente autoconstrucciones que no cumplen inclusive con los requisitos mínimos establecidos en reglamentaciones y normas vigentes. En esa misma línea, zonas con alta vulnerabilidad y baja resiliencia como asentamientos humanos sufrirían grandes pérdidas materiales y humanas tal como se mostró en los mapas de riesgo mostrados; por lo tanto, se necesita acciones de reducción del riesgo como por ejemplo la restricción de la altura de pircas,

reforzamiento estructural de pircas, reubicación de viviendas riesgosas ubicadas en las zonas altas de cerros entre otras medidas.

### 5.6.1 Pérdida Anual Esperada (PAE)

A partir de la evaluación de riesgo realizada se demuestra el alto riesgo sísmico en la cartera de viviendas del AAHH Edén del Manantial, donde se determinó pérdidas anuales esperadas del 7.4% del valor expuesto total. Este valor alto está asociado principalmente a la influencia directa de la PAE de los sistemas vivienda-pirca que para el caso de pircas de 1m y 1.5m de altura llegan a pérdidas anuales esperadas del 11% y 15% de su valor expuesto respectivamente.

A modo de comparación, en la Tabla 27 se muestra las PAE de los sistemas estructurales sin pirca junto con las PAE de los sistemas vivienda-pirca, además, del incremento porcentual de la PAE generado por la adición de la pirca a cada sistema estructural. Se logra apreciar incrementos considerables que ascienden a más del 1100% (hasta 11 veces más de PAE) para el caso de viviendas de madera sobre pircas de 1.5m de altura, lo cual verifica que la fragilidad del sistema vivienda-pirca está gobernado por la pirca.

Tabla 27.

*Incremento de la PAE para viviendas sobre pircas*

Sistema Estructural	Vivienda sin pirca PAE (%)	Incremento de la PAE (%)	
		Vivienda sobre Pirca H=1m PAE = 10.8%	Vivienda sobre Pirca H=1.5m PAE = 14.7%
<b>Madera</b>	1.2%	840%	1180%
<b>Mampostería Simple</b>	2.7%	306%	453%
<b>No Tecnificado</b>	6.3%	71%	132%

A partir de los resultados mostrados se encuentra que las pircas generan e incrementan las PAE y el riesgo en los sistemas estructurales a causa de su alta fragilidad; en consecuencia, es necesaria la reglamentación de su altura máxima permitida. De acuerdo con la guía de la Municipalidad Metropolitana de Lima (2013) se recomienda una altura máxima de 1m para pircas “chicoteadas”, técnica que consiste en la aplicación de una mezcla de cemento, arena y cal en la cara externa de las pircas. Asimismo, para cimentar las viviendas se debe respetar una distancia mínima de 2m con respecto a la pirca, ambas consideraciones se muestran en la Figura 69. De igual modo, para pircas mayores de 1m es obligatorio el uso de muros de contención de concreto armado. Por lo tanto, a partir de

los resultados obtenidos se identifica que los sistemas vivienda-pirca no están cumpliendo con dichas recomendaciones; en consecuencia, existe un alto riesgo presente en la población y los elementos expuestos. Además, es importante recordar que las pircas son consideradas como estructuras temporales.



Figura 69. Recomendación de la altura de pircas. Fuente: Municipalidad Metropolitana de Lima (2013)

En ese sentido, la cartera de viviendas analizada conformada principalmente por estos sistemas informales no serían sostenibles económicamente y se deberían tomar acciones de prevención y mitigación del riesgo. De la misma manera, estos resultados servirán de información preliminar para gobiernos locales y regionales en la toma de acciones y decisiones dentro del marco de la Gestión de Riesgos de Desastres.

### 5.6.2 Pérdidas Máximas Probables (PML)

A partir de la gráfica de PML mostrada en la Figura 64, se logra apreciar grandes pérdidas económicas de la cartera de viviendas ante eventos de periodo de retorno reducido o menor. A modo de ejemplo, se esperarían pérdidas de hasta el 45% del valor expuesto total ante un evento de periodo de retorno 100 años. Estas grandes pérdidas son debido a la alta fragilidad de los sistemas vivienda-pirca, las cuales ante un evento de periodo de retorno mayor a 75 años (sismo ocasional) se encontrarían colapsadas tal como se observó en el apartado de vulnerabilidad.

Por otro lado, la Superintendencia de Banca y Seguros (SBS) en la resolución N° 1305-2005 establece como referencia el periodo de retorno de 1000 años para el cálculo de las reservas catastróficas. En ese sentido, las pérdidas máximas probables serían de alrededor del 68% del valor expuesto total o en términos monetarios S/. 3, 605, 891 para dicho periodo de retorno.

## CAPITULO VI: CONCLUSIONES

La presente investigación verificó el alto riesgo de los sistemas vivienda-pircas, los cuales llegan a pérdidas anuales esperadas (PAE) de más del 10% para el caso de pircas 1m de altura y 15% para pircas de 1.5m de altura. A partir de la evaluación realizada se concluye que esta zona está muy propensa o en alto riesgo de sufrir daños considerables ante un evento sísmico de magnitud moderada. Por lo tanto, se recomienda realizar acciones de mitigación o reforzamiento estructural principalmente en las pircas debido a que estas representan la parte más vulnerable del sistema expuesto, asimismo, fomentar las iniciativas realizadas por instituciones importantes como el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), Centro de estudios y prevención de Desastres (PREDES), Centro Nacional de Estimación Prevención y reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), la Municipalidad Metropolitana de Lima (MML) entre otros.

Se comprobó que ante un sismo frecuente las pircas de 1.5m de altura colapsarían en su totalidad mientras que las pircas de 1m de altura presentarían un daño promedio de alrededor del 85%. Asimismo, ante un sismo ocasional el 100% de las pircas de 1m y 1.5m de altura colapsarían. Por lo tanto, se apreció la relación directa que existe entre la vulnerabilidad de las pircas con su altura. En ese sentido, es necesario tener en cuenta estos resultados junto con las recomendaciones brindadas por instituciones públicas como la MML (2013) para lograr reglamentar la altura máxima de estos muros de piedra en junta seca debido a que en la práctica común existe una gran cantidad de muros que llegan incluso a alturas de 3m.

El procedimiento constructivo de pircas reportado presentó ciertas carencias en la técnica y uso de los materiales, los cuales podrían ser mejoradas siguiendo recomendaciones internacionales como las propuestas por McCombie et al. (2015), entre estas el uso continuo de *through stones* en todo el proceso y añadir  *coping stones* en la parte superior final de las pircas para contribuir con la resistencia y la durabilidad de estas estructuras. De la misma manera, es importante implementar el uso de herramientas básicas para verificar la verticalidad del muro como son nivel, plomada, etc. Si bien los resultados muestran la alta vulnerabilidad de las pircas, su uso mejorado podría ser ventajoso en otras aplicaciones como caminos, terrazas de agricultura, construcciones en espacios



públicos y áreas naturales protegidas que no pongan en riesgo a la población. Entre sus ventajas están el costo reducido, disponibilidad de materiales y su bajo impacto al medio ambiente.

La amplificación debido a la topografía resultó ser un parámetro importante e influyente en la determinación de los valores de aceleración máxima del terreno en ladera debido a que implica considerables amplificaciones en el PGA. Actualmente, en la normativa peruana no se menciona alguna consideración o recomendación clara acerca de la influencia de dicho efecto en comparación con otros códigos internacionales como el Eurocódigo 8 y el código Francés, los cuales recomiendan factores de amplificación sísmico de acuerdo con la altura y el ángulo de inclinación del talud. Por lo tanto, es conveniente considerar estos efectos en nuestras normativas debido a que en la ciudad de Lima existe una gran cantidad de viviendas informales construidas sobre laderas.

A partir de los ensayos experimentales realizados en la mesa de ensayos estáticos se demostró la alta fragilidad de las pircas debido a que en la mayoría de los casos la falla de estos muros de piedra fue súbita (frágil); asimismo, esto contribuyó a considerar un solo estado de daño en el proceso de obtención de las curvas de vulnerabilidad. En consecuencia, se recomienda realizar futuras investigaciones, en las cuales se considere una mayor cantidad de especímenes con el objetivo de poder determinar y establecer niveles intermedios de daño. Asimismo, es importante considerar un análisis mucho más detallado y cuidadoso, el cual puede estar reflejado en un aumento ligeramente menor del ángulo de inclinación de la mesa de ensayo en comparación con los ensayos realizados en la presente investigación, esto permitirá una menor dispersión de los resultados y una mayor confiabilidad de estos.

La presente investigación aplicó una metodología práctica para la evaluación de riesgo sísmico en viviendas ubicadas en laderas, enfocada principalmente en asentamientos humanos en la periferia de la ciudad de Lima, en las cuales impera la informalidad en la construcción y la utilización de estructuras no convencionales como las pircas. En ese sentido, este estudio servirá como herramienta para que gobiernos locales y regionales establezcan ciertas acciones de mitigación, prevención y reglamentación dentro del marco de la Gestión de Riesgos de Desastres para la toma de decisiones y la implementación de un planeamiento urbano funcional.

## REFERENCIAS

- Alcántara, J. C. (2020). *Evaluación experimental del desempeño de muros de contención de piedra de junta seca usando especímenes a escala reducida..* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP
- Ashford, S. A., & Sitar, N. (1997). Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3), 692–700.
- Atkinson, G. M. & Goda, K. (2013). Probabilistic seismic hazard analysis of civil infrastructure. *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems* (pp. 3–28). Cambridge, United Kingdom: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857098986.1.3>
- Benito, B. & Jiménez, M. E. (1999). Peligrosidad sísmica. *Física de la Tierra*, 11, 13-47. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=124577>
- Bonett, R. L. (2003). Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño. *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios, Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada.* [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña]. <http://hdl.handle.net/10803/6230>
- Central America Probabilistic Risk Assessment (CAPRA). (2010). *Evaluación del Riesgo de desastre en Puerto Cortés.* Mapas de Amenaza y Riesgos, Aplicaciones en la Gestión del Riesgo, Honduras.
- Central America Probabilistic Risk Assessment (CAPRA). (2010). *Evaluación del Riesgo de desastre en Santiago de Atitlán.* Mapas de Amenazas y de Riesgos, Aplicaciones en la Gestión del Riesgo, Guatemala.
- Cardona, O. D., Ordaz, M. G., Reinoso, E. & Barbat, A. (2011, 18-20 Mayo). Enfoque integral para la evaluación probabilista del riesgo (CAPRA): Iniciativa para mejorar la efectividad de la gestión del riesgo de desastre. *4CNIS, Granada.* <http://hdl.handle.net/20.500.11762/19783>

- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). (2015). *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales*. Lima: CENEPRED.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583–1606.  
[http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(83\)90143-5](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(83)90143-5)
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1999). Earthquake Loss Estimation Methodology. *Technical Manual*, Washington, DC: FEMA.
- García, R., Miyashiro, J., Orejón, C., & Pizarro, F. (2014). Crecimiento urbano, cambio climático y ecosistemas frágiles: el caso de las lomas de Villa María del Triunfo en Lima Sur. *Perú Hoy*, 274–297.
- Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR). (2018). *Machine Learning for Disaster Risk Management*. Washington, DC: GFDRR.  
<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1468-0394.1988.tb00341.x>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (2005). *Inspección de la seguridad física del Asentamiento Humano Edén del Manantial*. Lima: INGEMMET
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall
- López, A. & Villacañas, J. (1999). Metodología Simplificada para el Análisis del Riesgo Sísmico. *Física de La Tierra*, 11, 269–284.  
<https://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/download/FITE9999110269A/12104>
- Martínez, R., Barrera, S. & Gómez, P. (2011). El método pseudoestático de estabilidad de presas: un análisis crítico. *Obras y Proyectos: Revista de Ingeniería Civil*, 9(abril), 30–37. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132011000100004>
- McCombie, P. F., Morel, J.-C., & Garnier, D. (2015). *Drystone Retaining Walls: Design, Construction and Assessment*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19095>
- Moreno, R., & Bairán, J. M. (2010). Curvas de fragilidad para evaluar el daño sísmico en edificios de concreto armado con losas reticulares. *Revista de La Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 25, 61–71.

- Municipalidad Metropolitana de Lima. (2013). *Guía para la habilitación urbana en asentamientos humanos y mitigación del riesgo* (pp. 22–33). Lima, Perú. <http://www.munlima.gob.pe/images/descargas/gerencias/GDU/SALT/guia-para-la-habilitacion-urbana-en-asentamientos-humanos-y-mitigacion-del-riesgo.pdf>
- Muñoz, A. (2019). *Ingeniería Sismorresistente*. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Muñoz, D. (1989). Conceptos básicos en riesgo sísmico. *Física de la Tierra*, 1, 199–216. [https://doi.org/10.5209/rev\\_FITE.1989.n1.13453](https://doi.org/10.5209/rev_FITE.1989.n1.13453)
- Ordaz, M., Aguilar, A. & Arboleda, J. (2007). *CRISIS 2007* (Versión 7.4) [Software]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pagliaroli, A., Lanzo, G., D'Elia, B., Costanzo, A. & Silvestri, F. (2007). Topographic amplification factors associated to cliff morphology: numerical results from two case studies in Southern Italy and comparison with EC8 recommendations. *Geotechnical Aspects of EC8, 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Paredes, J. (2016, 18 de Febrero). Vivir en las alturas. *El Comercio*, Lima. <https://elcomercio.pe/eldominical/actualidad/vivir-alturas-392960-noticia/>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2010). *Gestión del Riesgo Urbano*. Lima: PNUD.
- Rivas, G. Y. (2019). *Diseño de equipo para ensayos de pircas ante cargas laterales estáticas*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/14491>
- Sandi, H. (1986). Vulnerability and risk analysis for individual structures and systems. *Proceeding of the Eight European Conference on Earthquake Engineering*.
- Santa Cruz, S. (2013). *Evaluación Probabilística del riesgo sísmico de escuelas y hospitales de la ciudad de Lima*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Suarez, J. (2006). Estructuras de Contención de Gravedad. *Deslizamientos: Técnicas de remediación* (pp. 110–132). <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-ii-tecnicas-de-remediacion.html>

- Tavera, H., Bernal Esquia, I., Condori, C., Ordaz, M., Zevallos, A. & Ishizawa, O. (2014). *Re-evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú*. Lima, Perú: Instituto Geofísico del Perú (IGP). <http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/783>
- Yasmin, T., Chourasia, A., Bhattacharyya, S. K. & Parashar, J. (2015). Fragility Analysis for Seismic Vulnerability Assessment of Buildings: a Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 02(06), 502–508.
- Yauri, S. (2017). *Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8Mw*. Lima, Perú: Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI).
- Zanelli, C. T. (2019). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de pircas mediante modelación numérica en elementos discretos: aplicación al caso de las pircas en Carabayllo, Lima*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/13933>
- Zavala, C. A. (2018). *Guía técnica para reducir el riesgo de viviendas en laderas*. Programa de Reducción del riesgo en áreas vulnerables del distrito de Independencia. Lima, Perú: Fondo editorial Predes.

## **ANEXOS**

### **VIDEOS DE LOS 6 ENSAYOS EN MESA PARA ENSAYOS ESTÁTICOS Y ENTREVISTA A LOS MAESTROS PIRQUEROS**

