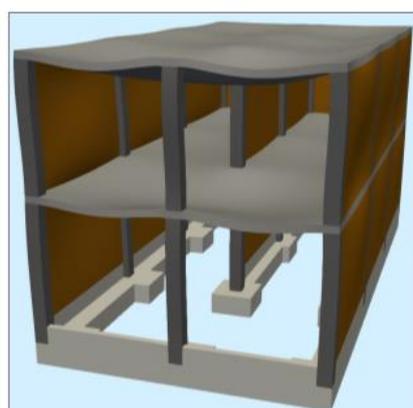
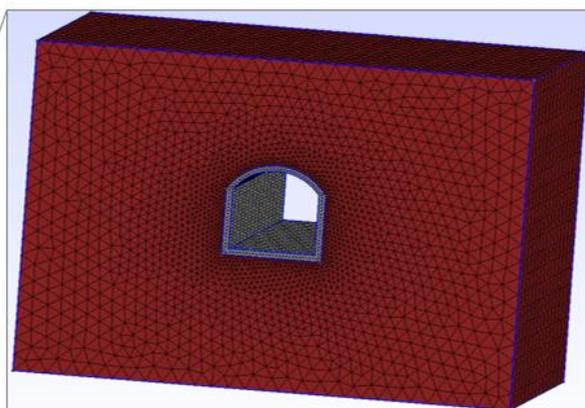


# SERVICIO DE RECOLECCIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN REFERIDA A METODOLOGÍAS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS A ESCALA URBANA



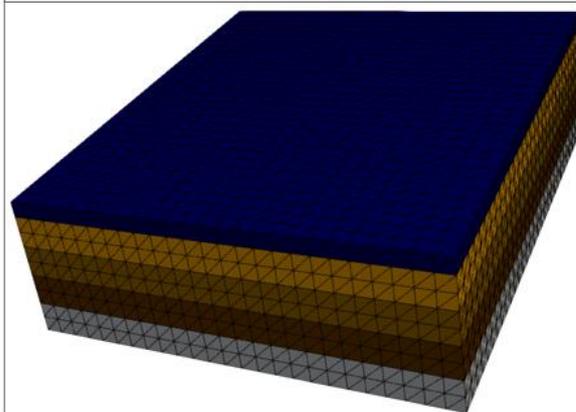
Viviendas de albañilería



Estructuras subterráneas



Amplificación del suelo



**ELABORADO POR**  
MAG. ING. JULIAN MILLER PALACIOS ESPINOZA

A handwritten signature in blue ink, reading "Julian Miller Palacios Espinoza". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

**SEGUNDO ENTREGABLE**  
**MAYO DE 2024**

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	4
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	5
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	11
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	12
1.1. Generalidades .....	12
1.2. Descripción del problema .....	12
1.3. Objetivos .....	13
<b>2. RECOPIACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN</b> .....	14
2.1. Búsqueda de información internacional .....	14
2.2. Búsqueda de información nacional .....	16
2.3. Análisis y sistematización de la información .....	18
2.3.1. Revisión sobre la respuesta sísmica de edificios – edificaciones de adobe .....	20
2.3.2. Revisión sobre la respuesta sísmica de edificios – edificaciones de concreto .....	21
2.3.3. Revisión sobre la respuesta sísmica de edificaciones de diferentes tipologías .....	22
2.3.4. Revisión sobre el comportamiento sísmico del suelo – aplicado a reservorios .....	24
2.3.5. Revisión sobre el comportamiento sísmico del suelo – aplicado a escala urbana .....	24
2.3.6. Revisión sobre computación de alto rendimiento aplicado a simulaciones de terremotos .....	28
2.3.7. Revisión de bibliografía sobre estabilidad de taludes .....	30
2.3.8. Revisión de bibliografía sobre estructuras enterradas - túneles .....	31
<b>3. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS REQUERIDAS</b> .....	33
3.1. Métodos numéricos .....	33
3.1.1. Método de elementos finitos .....	33
3.1.2. Generación de modelo de elementos finitos .....	33
3.1.3. Formatos de almacenamiento .....	34
3.1.4. Método de particionamiento .....	35
3.1.5. Integración en el tiempo .....	36
3.1.6. Condiciones de borde absorbente .....	37
3.1.7. Solución de sistemas lineales .....	38
3.1.8. Solución de sistemas no lineales .....	39
3.2. Lenguajes de programación .....	39
3.2.1. Python .....	39
3.2.2. Fortran .....	40
3.2.3. C .....	41

---

3.3.	Métodos computacionales .....	41
3.3.1.	Paralelismo a nivel de datos .....	41
3.3.2.	Paralelismo multinúcleo .....	42
3.3.3.	Paralelismo de memoria distribuida .....	42
3.3.4.	Computación acelerada por GPU .....	43
3.4.	Requerimiento de software .....	44
3.5.	Requerimiento de hardware .....	50
3.6.	Costo monetario de computación .....	52
<b>4.</b>	<b>REQUERIMIENTO DE INFORMACIÓN PARA EL MODELO 3D .....</b>	<b>54</b>
4.1.	Modelo digital de elevación .....	54
4.2.	Modelo 3D de velocidades sísmicas.....	56
4.3.	Caracterización geotécnica .....	57
4.4.	Inventario de estructuras .....	59
4.5.	Observación sísmica .....	60
<b>5.</b>	<b>ZONAS URBANAS PARA LA APLICACIÓN .....</b>	<b>63</b>
5.1.	San Borja .....	63
5.2.	Magdalena del Mar.....	71
5.3.	Chorrillos .....	77
5.4.	Rímac.....	83
5.5.	Zona para la aplicación piloto .....	87
5.6.	Disponibilidad de laboratorios e Información para la aplicación piloto .....	89
5.6.1.	Disponibilidad de laboratorios.....	90
5.6.2.	Ensayos geofísicos.....	92
5.6.3.	Perforaciones geotécnicas .....	97
5.6.4.	Registros acelerográficos .....	99
<b>6.</b>	<b>EVALUACIÓN SISMICA UTILIZANDO SIMULACIONES NUMÉRICAS 3D .....</b>	<b>104</b>
6.1.	Metodología .....	104
6.1.1.	Escenario sísmico .....	105
6.1.2.	Generación de Modelo 3D .....	105
6.1.3.	Simulación Numérica 3D .....	106
6.1.4.	Respuesta sísmica .....	107
6.2.	Ventajas de la simulación numérica 3D .....	107
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>109</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>110</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>117</b>

---

## RESUMEN

Debido a que el Perú se encuentra en la región del cinturón de fuego del Pacífico, conocida por su alta actividad sísmica, investigaciones recientes señalan de un terremoto de magnitud Mw 8.8 en la región central del país. Dado que estos eventos ocasionan pérdidas significativas en términos monetarios y de vidas humanas, surge la necesidad de estimar los posibles daños que se generan ante un evento sísmico de gran magnitud. Sin embargo, para poder llevar a cabo esta estimación en zonas urbanas de grandes dimensiones, es necesario apoyarse de los métodos y herramientas computacionales actuales. En ese sentido, en esta investigación se recopila y sistematiza la información acerca de métodos y herramientas computacionales para la simulación numérica de la propagación de ondas sísmicas a escala urbana.

En el capítulo I, se realiza la introducción sobre este tipo de simulaciones y se resalta la necesidad de mejorar las estimaciones realizadas en investigaciones que utilizan métodos simplificados. Asimismo, se describe el problema que se desea solucionar y se plantean los objetivos del estudio. En el capítulo II, se explica el proceso de búsqueda de información bibliográfica internacional y nacional a partir del año 2016. Luego, se identificaron las temáticas de estudio desarrolladas en estos documentos: estudio de la respuesta sísmica de edificios, estudio del comportamiento sísmico de suelos, computación de alto rendimiento aplicado a simulaciones de terremotos, estabilidad de taludes y estructuras subterráneas.

En el capítulo III, se indican los métodos y herramientas requeridas para la implementación de la simulación numérica a escala urbana. En primer lugar, se identificaron los métodos numéricos, dentro de los cuales se resaltan los métodos de elementos finitos, de particionamiento, integración en el tiempo, condiciones de borde absorbentes y la solución de sistemas lineales y no lineales. En segundo lugar, se listan algunos lenguajes de programación, incluyendo la característica y ventaja que ofrece cada uno para la implementación de los métodos numéricos. Dado que la demanda computacional para realizar simulaciones a escala urbana es alta, en este capítulo también se describen los principales métodos computacionales para llevar a cabo este tipo de simulaciones. Finalmente, en este capítulo se incluye la explicación de los requerimientos de software y hardware, y el costo monetario de computación.

Aunque la realización de simulaciones a escala urbana implica un alto costo computacional y existe una brecha en la infraestructura para computación de alto rendimiento en el país, este estudio describe métodos y alternativas actuales para hacer factible la realización de simulaciones numéricas de la propagación de ondas sísmicas en áreas urbanas. Este enfoque busca mejorar la estimación del daño, especialmente en viviendas construidas informalmente, estructuras subterráneas importantes y líneas vitales.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Antigüedad de la bibliografía revisada agrupada en intervalos de años. Fuente: Elaboración propia.....	18
Figura 2 Deformaciones plásticas para diferentes instantes de tiempo de un modelo de elementos finitos de edificaciones de adobe. Fuente: Otero (2021).....	20
Figura 3 Información utilizada para la generación del modelo 3D de la metrópolis de Tokio y distribución de distorsiones máximas de entrepiso expresado en radianes. Fuente: Hori et al., (2018). ....	21
Figura 4 Mapa de la pérdida obtenida mediante la metodología propuesta (izquierda) y mapa de la pérdida obtenida con el programa CAPRA (derecha). Fuente: Riaño et al., (2021). ...	22
Figura 5 Método propuesto para considerar la interacción entre el sitio y la ciudad (arriba). Distribución de la máxima distorsión de entrepiso de los edificios de la Universidad de Tsinghua, China (abajo). Fuente: Riaño et al., (2021). ....	23
Figura 6 Estructuras del suelo natural sin mejorar y del suelo natural mejorado. Fuente: Iguavil & Pocco (2023).....	24
Figura 7 Modelo generado para estimar la respuesta en suelos licuables (arriba). Exceso de presión de poros como resultado de la simulación numérica del suelo licuable sin mejoramiento y con mejoramiento (abajo). Fuente: Kusakabe et al., (2021). ....	25
Figura 8 Modelos numéricos 2D y 3D utilizados para el análisis (izquierda) y factores de amplificación obtenidos del análisis numérico de modelos 1D, 2D y 3D (derecha). Fuente: Falcone et al., (2018). ....	26
Figura 9 Modelo numérico 3D y falla sísmica considerada para la simulación numérica en el área urbana de Tesalónica, Grecia. Fuente: Smerzini et al., (2017). ....	27
Figura 10 Modelo de elementos finitos de $324 \times 10^9$ DOF para la región de Kanto, Japón. En la parte izquierda se muestra la propagación de ondas en tres instantes de tiempo: 15, 20 y 30 segundos. Fuente: Ichimura et al., (2022). ....	28
Figura 11 Modelo 3D considerado para la simulación numérica y respuesta sísmica de la ciudad en términos de desplazamiento. Fuente: Ichimura et al., (2018). ....	29
Figura 12 Modelo 3D considerado para la validación de los resultados (arriba). Error relativo del desplazamiento en comparación con la solución analítica (abajo). Fuente: Palacios et al., (2024). ....	30
Figura 13 Factor de seguridad del talud en función del tiempo. Fuente: Tardeo & Zanabria (2016). ....	31
Figura 14 Modelo de elementos finitos 2D de túnel y suelo (izquierda). Deformaciones unitarias producidas en el suelo (derecha). Fuente: Vergaray (2022).....	31
Figura 15 Modelo de elementos finitos tridimensional de la tubería y capas del suelo. Fuente: Alencastre (2023).....	32
Figura 16 Resultados de esfuerzos y deformaciones para suelo y tubería. Fuente: Alencastre (2023).....	32
Figura 17 Construcción de un modelo de elementos finitos. Fuente: Ichimura et al. (2016)	34
Figura 18 Formatos de almacenamiento de sistemas dispersos CRS y ELL. Fuente: Elaboración propia. ....	35
Figura 19 Ejemplo de particionamiento de un dominio rectangular en tres subdominios. Estos subdominios son asignados a procesos para la computación en paralelo. Fuente: (Kusakabe et al., 2021). ....	36
Figura 20 Método propuestos para considerar condiciones de borde absorbentes. Modelo propuesto por Saouma et al., (2011) (arriba) y método PML propuesto por Liu et al., (2014) donde se agrega una capa adicional en el borde (abajo). ....	37

---

Figura 21 Algoritmo para el método del gradiente conjugado para resolver el sistema lineal de gran dimensión $A\delta u = f$ . Fuente: Palacios et al., (2024) .....	38
Figura 22 Popularidad de lenguajes de programación desde el año 2005. Fuente: PYPL Popularity of Programming Language Index .....	40
Figura 23 Comparación de operaciones escalares y operaciones SIMD. Fuente: <a href="http://cvut.cz">http://cvut.cz</a> .....	41
Figura 24 Esquema de computadora con procesador de 4 núcleos que comparten una memoria. Fuente: futurelearn.com .....	42
Figura 25 Esquema de un sistema conformado por computadoras de memoria distribuida. Fuente: futurelearn.com .....	43
Figura 26 Comparación de tiempo de cómputo utilizando computación en CPUs y GPUs. Fuente: Kusakabe et al., (2021) .....	44
Figura 27 Ejemplo de malla de elementos finitos generado en Gmsh. Fuente: Elaboración propia.....	45
Figura 28 Geometría del modelo 3D para la simulación de la propagación de ondas. Fuente: Palacios et al. (2024) .....	46
Figura 29 Errores verticales y horizontales relativos máximos de la simulación numérica de propagación de ondas realizada en gQuake. Fuente: Palacios et al. (2024) .....	46
Figura 30 Análisis 3D de pavimento ante cargas de un vehículo: (a) Mallado 3D del pavimento y (b) Esfuerzos producidos en el pavimento. Fuente: Elaboración propia .....	47
Figura 31 Visualización de resultados de análisis 3D de elementos finitos de vivienda de albañilería: (a) modelo 3D de la vivienda, (b) visualización de la vivienda deformada ante cargas de gravedad. Fuente: Elaboración propia .....	48
Figura 32 Modelo 3D de elementos finitos generado y analizado con Plaxis 3D Ultimate. Fuente: PLAXIS 3D (2022) .....	48
Figura 33 Modelo analizado con SPEED. Fuente: Mazzieri et al. (2013).....	49
Figura 34 Evolución del poder computacional en el tiempo. Fuente: <a href="https://top500.org">https://top500.org</a> .....	52
Figura 35 Modelo de la ciudad cerca a la estación de Tokio con estructuras subterráneas, edificios y la información de las propiedades del suelo mediante capas. Fuente: Universidad de Tokio. ....	54
Figura 36 Áreas donde se tiene información de DEMs en Lima Metropolitana (color rojo). Fuente: <a href="https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/drones?c=lima">https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/drones?c=lima</a> .....	55
Figura 37 Puntos donde se tiene información de los ensayos geofísicos en Lima Metropolitana. Fuente: <a href="https://perfilesuelos.sencico.gob.pe/CatalogoWeb">https://perfilesuelos.sencico.gob.pe/CatalogoWeb</a> .....	56
Figura 38 Puntos donde se tiene información de las perforaciones geotécnicas en Lima Metropolitana. Fuente: <a href="https://perfilesuelos.sencico.gob.pe/CatalogoWeb">https://perfilesuelos.sencico.gob.pe/CatalogoWeb</a> .....	58
Figura 39 Estaciones acelerográficas activas del CISMID en Lima Metropolitana con información disponible para descargar. Fuente: <a href="https://www.cismid.uni.edu.pe/ceois/red/">https://www.cismid.uni.edu.pe/ceois/red/</a> ..	61
Figura 40 Cuatro de las estaciones acelerográficas del IGP en Lima Metropolitana con información disponible para descargar. Fuente: <a href="https://www.igp.gob.pe/servicios/aceldat-peru/reportes-registros-acelerometricos">https://www.igp.gob.pe/servicios/aceldat-peru/reportes-registros-acelerometricos</a> .....	61
Figura 41 Diez de las edificaciones instrumentadas del IGP en Lima Metropolitana con información disponible para descargar. Fuente: <a href="https://www.igp.gob.pe/servicios/aceldat-peru/edificaciones-instrumentadas">https://www.igp.gob.pe/servicios/aceldat-peru/edificaciones-instrumentadas</a> .....	62
Figura 42 Distrito de San Borja (línea roja). Fuente: Google maps.....	63
Figura 43 Área de estudio propuesta en el distrito de San Borja. Fuente: Google maps .....	64
Figura 44 Ensayos geofísicos y geotécnicos disponibles en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Sencico - Ensayos Geofísicos (2020) .....	64

Figura 45 Estación acelerográfica disponible en la base de datos del CISMID. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024).....	65
Figura 46 Estaciones acelerográficas disponibles en la base de datos de AUDAS. Fuente: AUDAS (2024).....	65
Figura 47 (a) Sensor de monitoreo instalado en el techo del edificio y (b) configuración del sistema de monitoreo. Fuente: CISMID, 2022.....	66
Figura 48 Estructura de SENCICO en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps .....	67
Figura 49 Estructura de INACAL en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps .....	67
Figura 50 Estructura de la IE N° 7083 en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps .....	68
Figura 51 Estructura de la Biblioteca Nacional del Perú en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps .....	68
Figura 52 Estructura de la estación de metro La Cultura en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps .....	69
Figura 53 Estructura del Gran Teatro Nacional área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps.....	69
Figura 54 Estructura de INDECOPI en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps .....	69
Figura 55 Estructura de OSIPTEL en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps .....	70
Figura 56 Estructura del centro comercial La Rambla en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps .....	70
Figura 57 Foto general de las viviendas en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps .....	71
Figura 58 Ubicación y extensión de la Costa Verde. Fuente: Mulatillo (2020) .....	71
Figura 59 Desprendimiento de escombros en acantilado de la Costa Verde. Fuente: ANDINA (2019) .....	72
Figura 60 Acantilados en la Costa Verde en Magdalena del Mar: (a) presencia de arcilla y grava en el acantilado, (b) presencia de grava, arcilla, limo y depósitos aluviales en el acantilado. Fuente: Murguytio & Tanaka (2014) .....	72
Figura 61 Área de estudio propuesta en Magdalena del Mar. Fuente: Google maps .....	73
Figura 62 Ensayos geofísicos disponibles en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Sencico - Ensayos Geofísicos (2020) .....	73
Figura 63 Estación acelerográfica disponible en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024) .....	74
Figura 64 Disponibilidad de modelos digitales de elevación en el área de Magdalena del Mar. Fuente: Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres - SIGRID (2019).....	74
Figura 65 Estructura de la UNFV en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps.....	75
Figura 66 Estructura del Colegio Alejandro Deustua en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps.....	75
Figura 67 Estructura de la IE Francisco Bolognesi en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps.....	76
Figura 68 Estructura del Colegio José Antonio Encinas en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps .....	76
Figura 69 Estructura del Colegio Salesiano Rosenthal de la Puente en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps.....	76

Figura 70 Estructura de la IEP Nuestra Señora De La Paz en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps .....	77
Figura 71 Foto general de las viviendas en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps .....	77
Figura 72 Ubicación y extensión de la Costa Verde. Fuente: CISMID (2010).....	78
Figura 73 Ubicación y extensión de la Costa Verde. Fuente: CISMID (2010).....	78
Figura 74 Distrito de Chorrillos (línea roja). Fuente: Google maps .....	79
Figura 75 Área de estudio propuesta en el distrito de Chorrillos. Fuente: Google maps.....	79
Figura 76 Ensayos geofísicos disponibles en el área de estudio del distrito de Chorrillos. Fuente: Sencico - Ensayos Geofísicos (2020) .....	80
Figura 77 Estación acelerográfica disponible en el área de estudio del distrito de Chorrillos. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024) .....	80
Figura 78 Estructura de la SENCICO en el área de estudio del distrito de Chorrillos. Fuente: Google maps .....	81
Figura 79 Estructura de la estación Matellini en el área de estudio del distrito de Chorrillos. Fuente: Google maps.....	81
Figura 80 Estructura del colegio Saint Patrick's School en el área de estudio del distrito de Chorrillos. Fuente: Google maps.....	82
Figura 81 Foto general de las viviendas en el área de estudio del distrito de Chorrillos. Fuente: Google maps .....	82
Figura 82 Material de las edificaciones en el distrito de Rímac. Fuente: INEI (2018) .....	83
Figura 83 Distrito de Rímac (línea roja). Fuente: Google maps.....	83
Figura 84 Área de estudio propuesta en el distrito de Rímac. Fuente: Google maps .....	84
Figura 85 Ensayos geofísicos disponibles en el área de estudio del distrito de Rímac. Fuente: Sencico - Ensayos Geofísicos (2020) .....	84
Figura 86 Estación acelerográfica y edificios monitoreados en el área de estudio del distrito de Rímac. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024) .	85
Figura 87 Estructura del CEPREUNI en el área de estudio del distrito de Rímac. Fuente: Google maps .....	85
Figura 88 Estructura del CISMID en el área de estudio de Rímac. Fuente: Google maps...	86
Figura 89 Estructura de Metro en el área de estudio de Rímac. Fuente: Google maps.....	86
Figura 90 Foto general de viviendas en el área de estudio de Rímac. Fuente: Google maps .....	86
Figura 91 Supercomputador MANATI. Fuente: IIAP (2024).....	90
Figura 92 Estructura del supercomputador Khipu. Fuente: UTEC (2024).....	91
Figura 93 HPC-Linux-Clúster en las instalaciones del IGP. Fuente: Montes et al. (2016)....	91
Figura 94 Ubicación del ensayo 5-MAM. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020) .	92
Figura 95 Perfil de velocidades de corte y estratigrafía del ensayo 5-MAM. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	92
Figura 96 Ubicación del ensayo 6-MAM. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020) .	93
Figura 97 Perfil de velocidades de corte y estratigrafía del ensayo 6-MAM. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	93
Figura 98 Ubicación del ensayo 23-MASW. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020) .....	94
Figura 99 Perfil de velocidades de corte y estratigrafía del ensayo 23-MASW. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	94
Figura 100 Ubicación del ensayo 24-MASW. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020) .....	95

---

Figura 101 Perfil de velocidades de corte y estratigrafía del ensayo 24-MASW. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	95
Figura 102 Ubicación del ensayo 25-MASW. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020) .....	96
Figura 103 Perfil de velocidades de corte y estratigrafía del ensayo 25-MASW. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	96
Figura 104 Ubicación de la perforación geotécnica 3-PER. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	97
Figura 105 Columna estratigráfica de la perforación geotécnica 3-PER. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020) .....	98
Figura 106 Registros acelerográficos de la base de datos del CISMID para el sismo de la Provincia Constitucional del Callao 14/04/2024. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024) .....	99
Figura 107 Registros acelerográficos de la base de datos del AUDAS00 para el sismo de la Provincia Constitucional del Callao 14/04/2024. Fuente: AUDAS (2024) .....	99
Figura 108 Registros acelerográficos de la base de datos del AUDAS01 para el sismo de la Provincia Constitucional del Callao 14/04/2024. Fuente: AUDAS (2024) .....	100
Figura 109 Registros acelerográficos de la base de datos del CISMID para el sismo de Huaral 15/02/2024. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024) .....	100
Figura 110 Registros acelerográficos de la base de datos del AUDAS00 para el sismo de Huaral 15/02/2024. Fuente: AUDAS (2024) .....	101
Figura 111 Registros acelerográficos de la base de datos del AUDAS01 para el sismo de Huaral 15/02/2024. Fuente: AUDAS (2024) .....	101
Figura 112 Registros acelerográficos de la base de datos del CISMID para el sismo de Chilca 12/02/2022. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024) .....	102
Figura 113 Registros acelerográficos de la base de datos del CISMID para el sismo de Lima 07/01/2022. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024) .....	102
Figura 114 Registros acelerográficos de la base de datos del CISMID para el sismo de Mala 22/06/2021. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024) .....	103
Figura 115 Metodología propuesta para la evaluación sísmica empleando simulaciones numéricas 3D.....	104
Figura 116 Ubicación del ensayo M15-1. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	117
Figura 117 Espectro de frecuencias obtenido del ensayo M15-1. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	118
Figura 118 Ubicación del ensayo M15-2. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	118
Figura 119 Espectro de frecuencias obtenido del ensayo M15-2. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	118
Figura 120 Ubicación del ensayo M15-3. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	119
Figura 121 Espectro de frecuencias obtenido del ensayo M15-3. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	119
Figura 122 Ubicación del ensayo M15-4. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	120
Figura 123 Espectro de frecuencias obtenido del ensayo M15-4. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	120
Figura 124 Ubicación del ensayo M15-5. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020).....	121

---

Figura 125 Espectro de frecuencias obtenido del ensayo M15-5. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)..... 121

---

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Listado de bibliografía internacional consultada y países de las afiliaciones de los autores. El listado se encuentra ordenado según el año de publicación o aceptación.....	15
Tabla 2 Resumen de las simulaciones numéricas realizadas en las referencias internacionales. El listado se encuentra ordenado según relevancia para este estudio.....	15
Tabla 3 Listado de bibliografía nacional consultada. El listado se encuentra ordenado según el año de publicación. ....	17
Tabla 4 Resumen de los métodos y análisis desarrollados en las referencias nacionales. ...	17
Tabla 5 Referencias relevantes para el estudio agrupadas por tema. ....	19
Tabla 6 Resumen del alcance de cada software. Fuente: Elaboración propia. ....	44
Tabla 7 Especificaciones de hardware requerido para el análisis de diferentes modelos. ...	50
Tabla 8 Descripción de las mejores 10 supercomputadoras. Fuente: <a href="https://top500.org">https://top500.org</a> .....	51
Tabla 9 Costo por hora de diferentes computadoras en dólares, obtenidos del sitio oficial de AWS ( <a href="https://calculator.aws">https://calculator.aws</a> ) actualizado al mes de abril de 2024. ....	53
Tabla 10 Parámetros para describir el comportamiento del suelo según el modelo de Hardening Soil. Fuente: Falcone et al. (2018) .....	58
Tabla 11 Resumen de información requerida .....	88
Tabla 12 Resumen de información disponible para las zonas estudio propuestas .....	88
Tabla 13 Resumen de puntajes para las zonas estudio propuestas .....	89
Tabla 14 Aceleraciones máximas registradas en estaciones en San Borja para sismos ligeros o moderados desde el año 2021.....	105

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Generalidades

Debido a la alta actividad sísmica en la región del cinturón de fuego del Pacífico, los países ubicados en esta zona, incluyendo Perú, se encuentran expuestos a la amenaza constante de terremotos. Según estudios que analizan la deformación de la corteza terrestre, se prevé la ocurrencia de un terremoto de magnitud Mw 8.8, en la región central de Perú (Villegas et al., 2016), donde reside más de la mitad de la población del país. Este evento podría generar cuantiosas pérdidas humanas y económicas, por lo que es crucial mejorar la estimación y mitigación del daño en infraestructura y líneas vitales (suministro de agua potable, electricidad, alcantarillado, carreteras, y sistemas de telecomunicaciones).

Las zonas urbanas son especialmente vulnerables a los terremotos. Estudios como el de Alva Hurtado & Ortiz Salas, (2020) describen el impacto de la licuación de suelos en diferentes ciudades del país desde el año 1582. Otros fenómenos registrados en terremotos es el deslizamiento de rocas en zonas urbanas de pendiente pronunciada como el estudio del comportamiento sísmico del acantilado de Lima realizado por Pretell & Aguilar, (2016). Asimismo, la vulnerabilidad de las viviendas construidas informalmente es un problema latente en el país; por ejemplo, durante el terremoto de Pisco en 2007 se evidenció que aproximadamente 90,000 edificios colapsaron siendo un gran porcentaje de ellos viviendas construidas de manera informal (Matsuzaki et al., 2014). Un aspecto adicional que considerar son las líneas vitales. Según Maruyama et al. (2023) un terremoto de magnitud Mw8.6 podría interrumpir el suministro de agua durante hasta un mes en varios distritos de Lima, lo que agrava aún más la situación.

Si bien se han llevado a cabo estudios para estimar el impacto de terremotos en varias ciudades del país, esta evaluación podría mejorarse significativamente mediante el uso de simulaciones numéricas tridimensionales que modelen la propagación de ondas sísmicas en zonas urbanas. Este enfoque se ha vuelto factible gracias a los sistemas de computación de alto rendimiento (High-Performance Computing, HPC) disponibles en la actualidad. Además de mejorar la precisión de las estimaciones, este tipo de simulaciones también permiten una evaluación integral de los fenómenos locales ocasionados por los terremotos.

### 1.2. Descripción del problema

Debido a la actividad tectónica asociada a la convergencia de placas en zonas de subducción, como es el caso del cinturón de fuego del Pacífico, países ubicados en tales zonas, incluyendo Perú, se enfrentan a una amenaza constante de terremotos. En respuesta a esta amenaza inminente de terremotos, se han llevado a cabo diversos estudios con el propósito de estimar el impacto en la infraestructura y las líneas vitales ante este tipo de eventos. Tradicionalmente, la evaluación del daño se efectúa de manera aproximada mediante el empleo de modelos simplificados y funciones que establecen la relación entre la intensidad sísmica y el nivel de daño, conocidas como curvas de fragilidad.

No obstante, persiste la necesidad de mejorar la estimación del daño en zonas urbanas que incluyen viviendas, estructuras subterráneas y líneas vitales. Una estrategia viable para mejorar dicha estimación es la aplicación de simulaciones numéricas mediante modelos

tridimensionales de alta fidelidad a escala urbana. La ejecución de estas simulaciones de gran escala es posible mediante recursos computacionales y técnicas de computación de alto rendimiento. Sin embargo, aún es necesario reducir el tiempo computacional asociado a este tipo de simulaciones y, por ende, disminuir los costos operativos. Este objetivo puede alcanzarse identificando alternativas más eficientes en términos de hardware y software.

Gracias a la evolución tecnología y a fondos para la investigación científica, países desarrollados como Japón han aprovechado el poder de las supercomputadoras para realizar este tipo de simulaciones numéricas. Por ejemplo, Ichimura et al., (2022) realizaron por primera vez una simulación totalmente acoplada de la propagación de ondas sísmicas desde la falla sísmica, pasando por los estratos del suelo hasta llegar a la ciudad donde se encuentran las estructuras. Sin embargo, la aplicación de estas herramientas tecnológicas aún no se ha llevado a cabo en nuestro país debido a una falta de infraestructura para computación de alto rendimiento, experiencia, entre otros factores. En ese sentido es necesario estudiar la factibilidad de realizar simulaciones numéricas de la respuesta sísmica de ciudades vulnerables a terremotos en países en vías de desarrollo.

Al abordar los problemas mencionados y realizar este tipo de simulaciones en el país, las autoridades dispondrían de una herramienta más precisa que los métodos convencionales para la estimación del daño sísmico en zonas urbanas. Este avance podría contribuir significativamente a una gestión más efectiva ante eventos sísmicos.

### 1.3. Objetivos

Este informe tiene como objetivo recopilar información sobre metodologías de simulación numérica tridimensional para la propagación de ondas sísmicas en medios de gran dimensión y estudiar la factibilidad de aplicar dichas simulaciones en zonas urbanas con alto riesgo sísmico y vulnerabilidad de viviendas.

- Recolectar información nacional e internacional sobre metodologías de simulación numérica de propagación de ondas sísmicas, con énfasis en casos de aplicación en zonas urbanas y la evaluación de la amenaza sísmica.
- Analizar y sistematizar la información recopilada e identificar metodologías aplicables a las zonas urbanas del país.
- Identificar herramientas y métodos computacionales utilizados para realizar simulaciones numéricas tridimensionales de propagación de ondas sísmicas a escala urbana.
- Estimar los costos operativos y de adquisición de software y hardware necesarios para llevar a cabo las simulaciones.

## 2. RECOPIACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

El presente capítulo se centra en la recopilación y selección de estudios relevantes a nivel internacional y nacional sobre simulación sísmica y evaluación de riesgos en zonas urbanas.

En el primer subcapítulo, se detalla el proceso de búsqueda de información internacional utilizando diversas fuentes como "Google Scholar" y "ScienceDirect". Se aplicaron criterios específicos para seleccionar investigaciones pertinentes, lo que resultó en la identificación de 10 artículos científicos altamente relevantes para los objetivos de este estudio. En el segundo subcapítulo, se explica el proceso de búsqueda de información nacional, donde se priorizaron tesis y publicaciones de universidades peruanas, así como investigaciones relacionadas con el análisis de la respuesta sísmica del suelo y el comportamiento de edificaciones. Esto condujo a la identificación de 7 investigaciones que guardan relación con los objetivos de este estudio.

La información sistematizada en este capítulo permitirá comprender el estado del arte en la simulación numérica 3D de la propagación de ondas sísmicas en zonas urbanas, y servirá como base para el desarrollo del presente estudio.

### 2.1. Búsqueda de información internacional

Para realizar la búsqueda de referencias internacionales, se utilizaron diversos sitios como "Google Scholar", "ScienceDirect", "IEEE Xplore", entre otros. De las investigaciones encontradas en estos sitios, se seleccionaron investigaciones pertinentes para este estudio siguiendo los siguientes criterios:

- Publicaciones cuyas palabras claves estuvieran relacionadas a "Earthquake Simulation", "Three-dimensional Analysis", "Urban Scale" y "HPC".
- Investigaciones que fueron publicadas o aceptadas desde el año 2016 hasta la fecha actual.
- Investigaciones de alto impacto que hayan sido citadas en otras investigaciones.
- Estudios que utilicen programas para la simulación numérica 3D, cuyos resultados hayan sido validados con soluciones analíticas o resultados experimentales.

Cabe resaltar que la búsqueda no solo se limitó a estos criterios, sino que también se analizó el contenido de los artículos para identificar a aquellos que tienen estrecha relación con el presente estudio. De esta manera se seleccionó un total de 10 artículos científicos, los cuales se encuentran en la Tabla 1.

Las referencias internacionales analizadas se centran en la simulación de la propagación de ondas sísmicas en tres procesos clave para estimar la respuesta en zonas urbanas:

- A. La propagación de ondas en la corteza como resultado de una falla sísmica.
- B. La amplificación sísmica no lineal en estratos sedimentarios cerca de la superficie terrestre.
- C. El movimiento sísmico en zonas urbanas, abarcando tanto las estructuras en la superficie como las estructuras subterráneas.

En la Tabla 2 se resume la información recopilada de las referencias internacionales, considerando cómo se define el modelo para la simulación numérica de la propagación de ondas sísmicas en estas tres etapas. Por ejemplo, si la simulación se describe mediante un modelo "3D|3D|3D", significa que se han utilizado modelos numéricos tridimensionales en las tres etapas de la propagación.

Tabla 1 Listado de bibliografía internacional consultada y países de las afiliaciones de los autores. El listado se encuentra ordenado según el año de publicación o aceptación.

N°	Bibliografía	Título	Afiliación de autor
1	Palacios et al., 2024	Simulating earthquake-induced wave propagation with GPU-accelerated computing	Perú / Japón
2	Ichimura et al., 2022	152K-computer-node parallel scalable implicit solver for dynamic nonlinear earthquake simulation	Japón
3	Kusakabe et al., 2021	Development of regional simulation of seismic-motion and induced liquefaction enhanced by GPU computing	Japón
4	Riaño et al., 2021	Integration of 3D large-scale earthquake simulations into the assessment of the seismic risk of Bogota, Colombia	EE. UU. / Colombia
5	Ichimura et al., 2018	A fast scalable implicit solver for nonlinear time-evolution earthquake city problem on low-ordered unstructured finite elements with artificial intelligence and transprecision computing	Japón / EE. UU.
6	Hori et al., 2018	Application of high-performance computing to earthquake hazard and disaster estimation in urban area	Japón
7	Lu et al., 2018	A numerical coupling scheme for nonlinear time history analysis of building on a scale considering site-city interaction effects	China
8	Falcone et al., 2018	Site response analysis of an urban area: A multi-dimensional and non-linear approach	Italia
9	Smerzini et al., 2017	Evaluation of earthquake ground motion and site effects in the Thessaloniki urban area by 3D finite-fault numerical simulations	Grecia / Italia
10	Roten et al., 2016	High-frequency nonlinear earthquake simulations on petascale heterogeneous supercomputers	EE. UU.

Tabla 2 Resumen de las simulaciones numéricas realizadas en las referencias internacionales. El listado se encuentra ordenado según relevancia para este estudio.

Bibliografía	Descripción	Método	Tipo Análisis	Modelo
Ichimura et al., 2022	Análisis de un modelo 3D de elementos finitos de la región de Kanto, Japón	Elementos finitos	ADNL*	3D 3D 3D
Hori et al., 2018	Análisis de un modelo 3D del suelo y de modelos simplificados de estructuras en la ciudad de Tokyo, Japón	Elementos finitos y MDOF <sup>+</sup>	ADNL*	3D 3D 1D
Smerzini et al., 2017	Análisis de un modelo 3D de la corteza y de un modelo simplificado del suelo para la ciudad de Tessaloniki, Grecia utilizando el programa SPEED.	Elementos espectrales y modelo 1D equivalente	ADNL*	3D 1D --
Riaño et al., 2021	Análisis de un modelo 3D de la corteza y análisis simplificado del suelo para la ciudad de Bogotá, Colombia utilizando el programa HERCULES.	Elementos finitos y curvas de fragilidad (CF)	ADNL* y uso de CF	3D 1D CF

Lu et al., 2018	Análisis de un modelo 3D de la corteza y de modelos simplificados de edificios para el campus de la Universidad de Tsinghua, China.	Elemento espectral y MDOF <sup>+</sup>	ADNL*	-- 3D 1D
Ichimura et al., 2018	Análisis de un modelo 3D de elementos finitos de la región de Tokyo, Japón utilizando inteligencia artificial.	Elementos finitos	ADNL*	3D 3D 3D
Kusakabe et al., 2021	Análisis de un modelo 3D de elementos finitos para estudiar el comportamiento de suelos licuables.	Elementos finitos	ADNL*	-- 3D 3D
Palacios et al., 2024	Análisis de un modelo 3D de elementos finitos para estudiar vibraciones inducidas utilizando el programa gQuake.	Elementos finitos	ADL**	-- 3D --
Falcone et al., 2018	Análisis de un modelo 3D de elementos finitos en el valle de Bovino, Italia utilizando el software Plaxis 3D.	Elementos finitos	ADNL*	-- 3D --
Roten et al., 2016	Análisis de un modelo 3D de diferencias finitas para la falla de San Andres, USA.	Diferencias finitas	ADNL*	3D 3D --

\* ADNL: Análisis Dinámico No Lineal

\*\* ADL: Análisis Dinámico Lineal

+ MDOF: Modelo de varios grados de libertad (Multi-Degree of Freedom)

## 2.2. Búsqueda de información nacional

Para la búsqueda de la información nacional se hizo uso del Registro Nacional de Trabajos de Investigación (RENATI) y del buscador de “Google Scholar”. De las investigaciones encontradas en estos sitios, se seleccionaron investigaciones pertinentes para este estudio siguiendo los siguientes criterios:

- Tesis publicadas por universidades peruanas.
- Publicaciones cuyas palabras claves están relacionadas a “Elementos finitos”, “Tridimensional”, “Amenaza Sísmica”, “Propagación de ondas sísmicas”, “Suelos” y “Perú”.
- Investigaciones que fueron publicadas o aceptadas desde el año 2016 hasta la fecha actual.
- Investigaciones relacionadas al análisis de la respuesta del suelo o temas relacionados como: estabilidad de taludes, estructuras enterradas y mejoramiento del suelo.
- Investigaciones que estudien el comportamiento dinámico de edificaciones.

Una vez realizada la búsqueda se identificaron las investigaciones de acceso libre relacionadas con el tema mediante la revisión del título, índice, resumen y conclusiones. De esta manera, se identificó un total de 7 investigaciones nacionales, las cuales se muestran en la Tabla 3.

Lamentablemente, se ha encontrado un número limitado de investigaciones peruanas relacionadas con el tema del presente estudio. Además, de las investigaciones encontradas,

se puede concluir que la simulación numérica tridimensional de propagación de ondas sísmicas no está muy desarrollada en el país. No obstante, es importante destacar que se ha identificado el método de elementos finitos como una técnica comúnmente utilizada para estudiar las respuestas estáticas y dinámicas del suelo en estas investigaciones. El método y el tipo de análisis desarrollado en cada investigación se detallan en la Tabla 4. En la tabla en mención se especifica el tipo de análisis estructural realizado en cada investigación, así mismo, se señala si éstas realizan la estimación del daño a través de deformaciones o esfuerzos.

Tabla 3 Listado de bibliografía nacional consultada. El listado se encuentra ordenado según el año de publicación.

N°	Bibliografía	Título	Universidad
1	Iguavil & Pocco, 2023	Propuesta de mejoramiento de suelo a fin de mitigar los efectos de las ondas sísmicas en un estrato intermedio de suelo blando mediante un análisis lineal equivalente para asegurar la cimentación de un reservorio de agua en el departamento de Cajamarca	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas
2	Alencastre, 2023	Análisis de deflexiones y esfuerzos en tuberías de acero de pared delgada enterradas bajo vías de acarreo de camiones mineros por el método de los elementos finitos	Pontificia Universidad Católica
3	Vergaray, 2022	Análisis sísmico de estructuras enterradas	Universidad Nacional de Ingeniería
4	Otero, 2021	Comportamiento sísmico de edificaciones de adobe de un nivel influenciados por la relación de aspecto	Universidad Nacional de Ingeniería
5	García & Vásquez, 2020	Modelamiento en elementos finitos de un tunnel liner para cruce de sistema de agua potable y alcantarillado – Trébol de Javier Prado	Universidad Ricardo Palma
6	Trigos, 2018	Análisis matricial de estructuras por el método de elementos finitos y su aplicación a túneles	Universidad José Carlos Mariátegui
7	Tardeo & Zanabria, 2016	Análisis Dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos en la zona de Huayllapampa del distrito de Cuenca - Huncavelica	Universidad Nacional de Huancavelica

Tabla 4 Resumen de los métodos y análisis desarrollados en las referencias nacionales.

Bibliografía	Descripción	Método	Tipo Análisis	¿Estima daño?
Tardeo & Zanabria, 2016	Análisis bidimensional estático y dinámico de elementos finitos en estabilidad de taludes	Elementos finitos	ADNL* 2D	Sí
Trigos, 2018	Análisis bidimensional estático de elementos finitos de túneles	Elementos finitos	AENL** 2D	Sí
García & Vásquez, 2020	Análisis tridimensional estático de elementos finitos de túneles	Elementos finitos	AENL 3D	Sí

Iguavil & Pocco, 2023	Mejoramiento del suelo para la reducción de la propagación de ondas sísmicas	Respuesta sísmica de sitio	ADNL 1D	No
Alencastre, 2023	Análisis tridimensional estático no lineal de elementos finitos de tubería enterrada bajo vías	Elementos finitos	AENL 3D	Sí
Vergaray, 2022	Análisis sísmico bidimensional dinámico de estructuras enterradas	Elementos finitos	ADNL 2D	Sí
Otero, 2021	Análisis tridimensional de elementos finitos dinámico no lineal en estructuras de adobe	Elementos finitos	ADNL 3D	Sí

\* ADNL: Análisis Dinámico No Lineal

\*\* AENL: Análisis Estático No Lineal

### 2.3. Análisis y sistematización de la información

El presente capítulo tiene como objetivo central examinar y organizar las referencias bibliográficas relevantes para el estudio. Este proceso permitirá identificar patrones, tendencias y áreas de enfoque específicas en relación con la respuesta sísmica de zonas urbanas. Para llevar a cabo este análisis se revisó diversas investigaciones incluyendo referencias nacionales e internacionales. El total de investigaciones revisadas en este estudio son 43 que abarcan diversas temáticas como la amenaza sísmica, respuesta sísmica de edificios, el comportamiento sísmico del suelo, computación de alto rendimiento aplicado a simulaciones de terremotos, métodos y herramientas computacionales, estabilidad de taludes y estructuras subterráneas. La distribución de estas 43 investigaciones a lo largo del tiempo se visualiza en la Figura 1, donde se destaca que más de la mitad de las referencias corresponden a los últimos siete años.

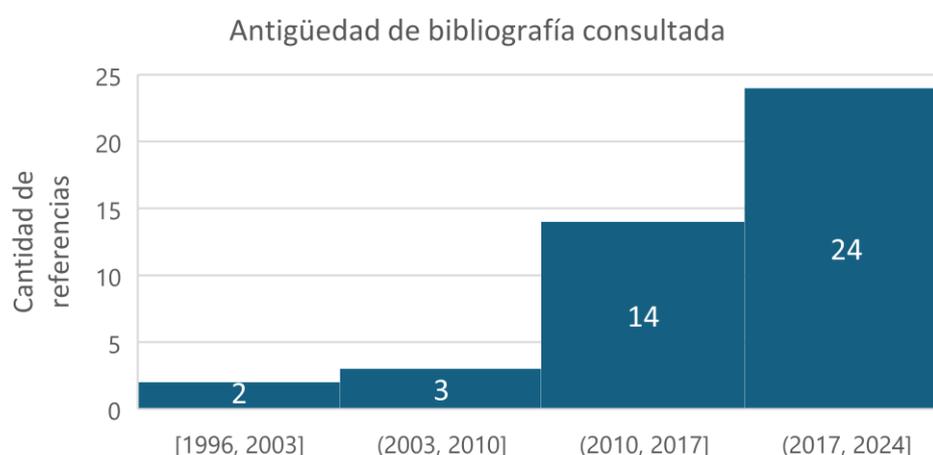


Figura 1 Antigüedad de la bibliografía revisada agrupada en intervalos de años. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5 ofrece una visión detallada de la literatura científica y técnica más destacada en áreas específicas. Cada temática aborda una serie de enfoques particulares, presentando propuestas innovadoras que contribuyen al conocimiento del comportamiento sísmico y la construcción de infraestructuras resilientes frente a terremotos. Brevemente en los siguientes párrafos se describen estas temáticas según las investigaciones revisadas.

Tabla 5 Referencias relevantes para el estudio agrupadas por tema.

Temática		Bibliografía	Título
Estudio de la respuesta sísmica de edificios	Edificaciones de adobe	Otero, 2021	Comportamiento sísmico de edificaciones de adobe de un nivel influenciados por la relación de aspecto
	Concreto	Hori et al., 2018	Application of high-performance computing to earthquake hazard and disaster estimation in urban area
	Diferentes tipologías	Riaño et al., 2021	Integration of 3D large-scale earthquake simulations into the assessment of the seismic risk of Bogota, Colombia
		Lu et al., 2018	A numerical coupling scheme for nonlinear time history analysis of building on a scale considering site-city interaction effects
Estudio del comportamiento sísmico del suelo	Aplicado a Reservorios	Iguavil & Pocco, 2023	Propuesta de mejoramiento de suelo a fin de mitigar los efectos de las ondas sísmicas en un estrato intermedio de suelo blando mediante un análisis lineal equivalente para asegurar la cimentación de un reservorio de agua en el departamento de Cajamarca
	Aplicado a escala urbana	Kusakabe et al., 2021	Development of regional simulation of seismic-motion and induced liquefaction enhanced by GPU computing
		Falcone et al., 2018	Site response analysis of an urban area: A multi-dimensional and non-linear approach
		Smerzini et al., 2017	Evaluation of earthquake ground motion and site effects in the Thessaloniki urban area by 3D finite-fault numerical simulations
Computación de alto rendimiento aplicado a simulaciones de terremotos	Palacios et al., 2024	Simulating earthquake-induced wave propagation with GPU-accelerated computing	
	Ichimura et al., 2022	152K-computer-node parallel scalable implicit solver for dynamic nonlinear earthquake simulation	
	Ichimura et al., 2018	A fast scalable implicit solver for nonlinear time-evolution earthquake city problem on low-ordered unstructured finite elements with artificial intelligence and transprecision computing	
	Roten et al., 2016	High-frequency nonlinear earthquake simulations on petascale heterogeneous supercomputers	
Estabilidad de taludes		Tardeo & Zanabria, 2016	Análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos en la zona de Huayllapampa del distrito de Cuenca - Huancavelica
Estructuras subterráneas	Túneles	Vergaray, 2022	Análisis sísmico de estructuras enterradas
		García & Vásquez, 2020	Modelamiento en elementos finitos de un tunnel liner para cruce de sistema de agua potable y alcantarillado – Trébol de Javier Prado
		Trigos, 2018	Análisis matricial de estructuras por el método de elementos finitos y su aplicación a túneles
	Tuberías	Alencastre, 2023	Análisis de deflexiones y esfuerzos en tuberías de acero de pared delgada enterradas bajo vías de acarreo de camiones mineros por el método de los elementos finitos

### 2.3.1. Revisión sobre la respuesta sísmica de edificios – edificaciones de adobe

#### Otero, (2021): “Comportamiento sísmico de edificaciones de adobe de un nivel influenciados por la relación de aspecto”

En esta tesis se evalúa la amenaza sísmica a la que están expuestas las edificaciones de adobe en el Perú debido al silencio sísmico existente en la región central del país. Asimismo, se llevó a cabo la medición de vibraciones ambientales de edificaciones de adobe de Hospital Nacional Dos de Mayo, ubicado en Lima, con el fin de calibrar sus propiedades mecánicas en un modelo numérico tridimensional de elementos finitos. Luego de calibrar las propiedades, se realizó la simulación numérica de modelos de edificaciones de adobe con el objetivo de estudiar el comportamiento sísmico. Se utilizaron registros sísmicos históricos ocurridos en el Perú, y se empleó el modelo “concrete damaged plasticity” para los análisis dinámicos. Como resultados se obtuvieron las deformaciones plásticas que se producirían en este tipo de edificaciones ante un evento sísmico. La Figura 2 muestra la respuesta sísmica en tres instantes de tiempo.

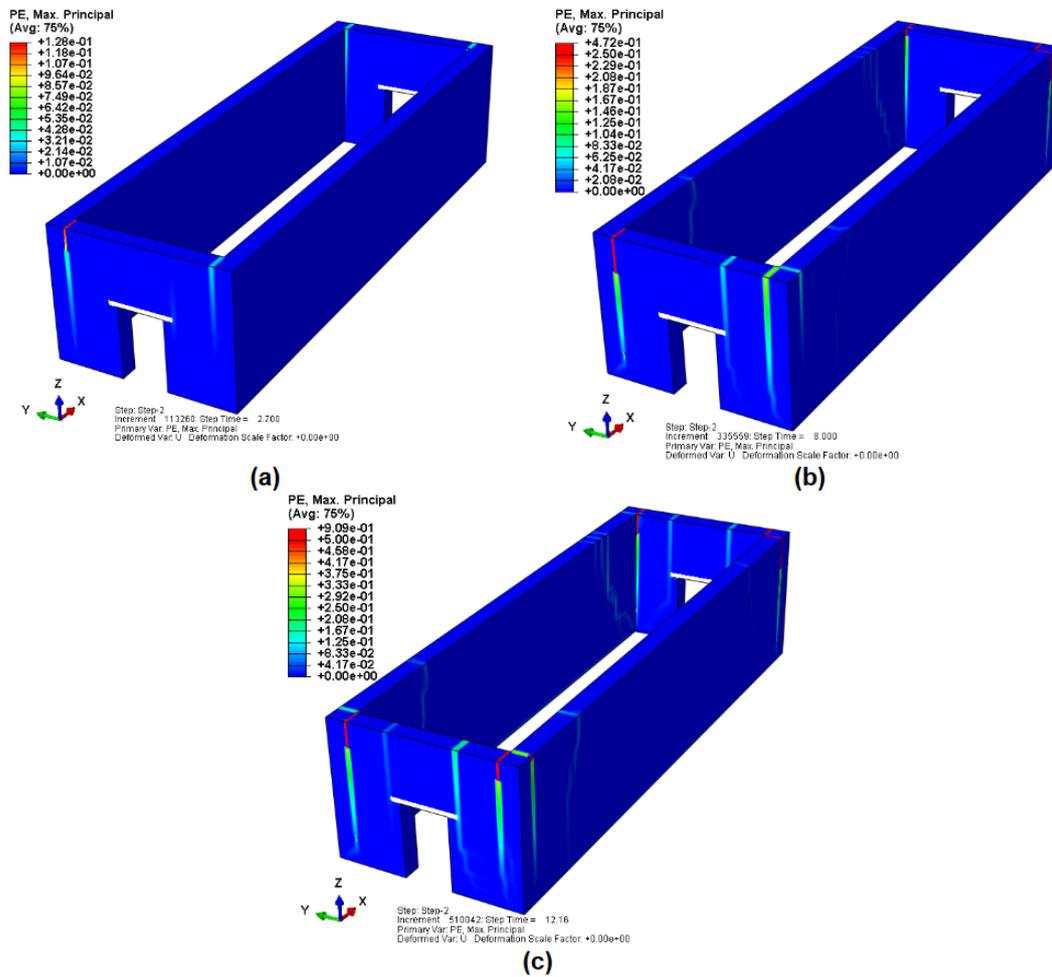


Figura 2 Deformaciones plásticas para diferentes instantes de tiempo de un modelo de elementos finitos de edificaciones de adobe. Fuente: Otero (2021)

### 2.3.2. Revisión sobre la respuesta sísmica de edificios – edificaciones de concreto

#### Hori et al., (2018): “Application of high-performance computing to earthquake hazard and disaster estimation in urban area”

Con la finalidad de analizar la amenaza y el potencial desastre de terremotos Hori et al., (2018) realizaron simulaciones numéricas de terremotos para la metrópolis de Tokio. Para ello, se generó un modelo tridimensional de elementos finitos de una región de 10 x 10 km<sup>2</sup>. Este modelo contiene un poco más de 10<sup>11</sup> grados de libertad (Degrees of Freedom, DOF) y considera múltiples capas de suelo (estas capas se definen a partir de modelos de velocidades y de modelos digitales de la superficie). Luego, seleccionaron el registro sísmico para la simulación (sismo de Kobe, 1995). Considerando algunos parámetros para describir el comportamiento no lineal del suelo, realizaron la simulación sísmica del modelo de elementos finitos utilizando elementos sólidos tridimensionales. A partir de los resultados de la simulación, realizaron un post-procesamiento para obtener intensidades espectrales y distorsiones máximas de entrepiso. Estas distorsiones fueron obtenidas asumiendo que todas las edificaciones son de concreto armado. Finalmente, utilizaron esta información para determinar los efectos y daño en la infraestructura. La Figura 3 muestra los datos de entrada para la generación de un modelo 3D de área 1,250 x 1,250 m<sup>2</sup> y las distorsiones máximas de entrepiso como parte de los resultados de la simulación numérica.

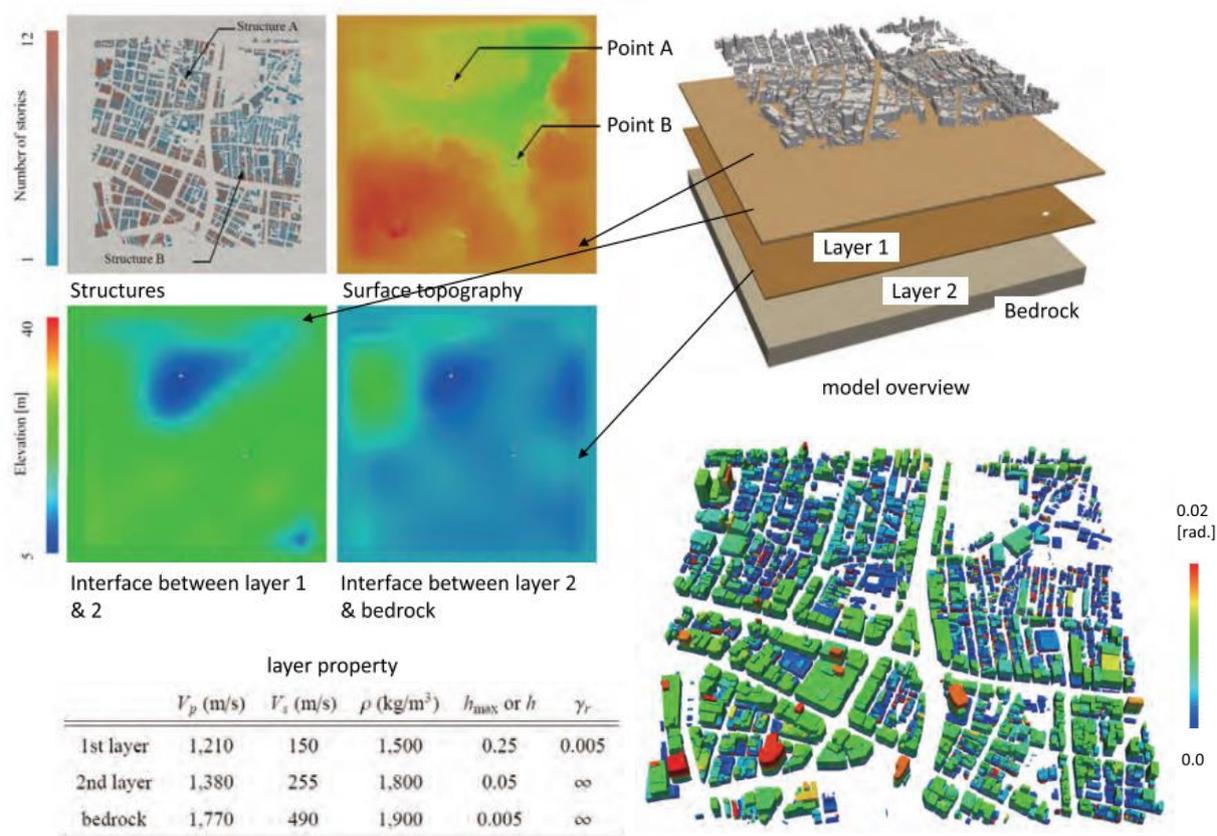


Figura 3 Información utilizada para la generación del modelo 3D de la metrópolis de Tokio y distribución de distorsiones máximas de entrepiso expresado en radianes. Fuente: Hori et al., (2018).

### 2.3.3. Revisión sobre la respuesta sísmica de edificaciones de diferentes tipologías

#### Riaño et al., (2021): “Integration of 3D large-scale earthquake simulations into the assessment of the seismic risk of Bogota, Colombia”

Debido a que la capital de Colombia, Bogotá, está expuesta a la amenaza de fallas sísmicas locales y regionales, Riaño et al., (2021) desarrollaron una plataforma para estudiar los efectos de amplificación sísmica y estimar el riesgo sísmico de Bogotá. Para este fin generaron un modelo 3D de elementos finitos de una región de 130 x 101 km<sup>2</sup>. Este modelo se genera considerando la distribución de velocidades sísmicas y topografía de la región. Además, generaron un modelo de ruptura a partir de los sismos históricos y teniendo en cuenta la ocurrencia de posibles terremotos catastróficos.

Utilizando este modelo de ruptura y el modelo 3D, calcularon la respuesta sísmica en la roca madre mediante el programa de elementos finitos, Hercules. Posteriormente, emplearon esta respuesta para calcular la respuesta sísmica en la superficie. Finalmente, utilizaron la respuesta en la superficie para estimar las pérdidas económicas debido al daño en las estructuras. La Figura 4 muestra la comparación entre los resultados obtenidos en este estudio y los resultados de un programa de estimación de pérdidas llamado CAPRA.

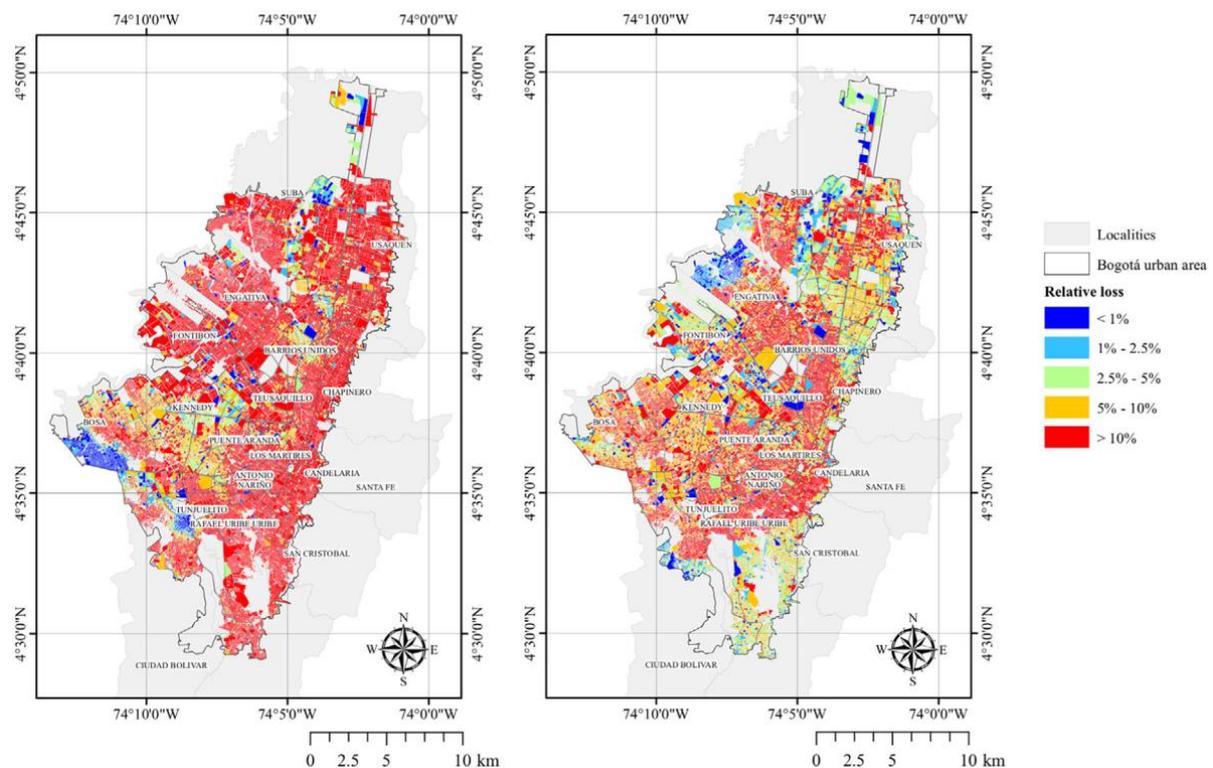


Figura 4 Mapa de la pérdida obtenida mediante la metodología propuesta (izquierda) y mapa de la pérdida obtenida con el programa CAPRA (derecha). Fuente: Riaño et al., (2021).

#### Lu et al., (2018): “A numerical coupling scheme for nonlinear time history analysis of building on a scale considering site-city interaction effects”

Para mejorar la simulación del daño sísmico en edificios a escala regional, Lu et al., (2018) propusieron un método para considerar la interacción entre el sitio y la ciudad. Para validar este método, realizaron un ensayo en mesa vibradora de un espécimen de  $2.1 \times 1.8 \times 0.8 \text{ m}^3$ . Mediante este ensayo se comprobó que el enfoque numérico propuesto simula con precisión la influencia de edificios densamente distribuidos en el sitio. Luego, aplicaron este enfoque a un área de estudio que abarca el campus de la Universidad de Tsinghua, China. El modelo 3D generado para esta área de estudio es de  $3 \times 3 \text{ km}^2$ . Utilizando este modelo y el programa de código libre SPEED, realizaron la simulación numérica tridimensional. Utilizando los resultados de esta simulación, obtuvieron los desplazamientos en la base de los edificios para realizar el análisis de la respuesta dinámica de cada uno usando un modelo no lineal de MDOF. Finalmente, se obtuvieron como resultado los indicadores para estimar el daño. La Figura 5 resume el método propuesto y muestra los resultados obtenidos para estimar la distorsión de entrepiso en edificios.

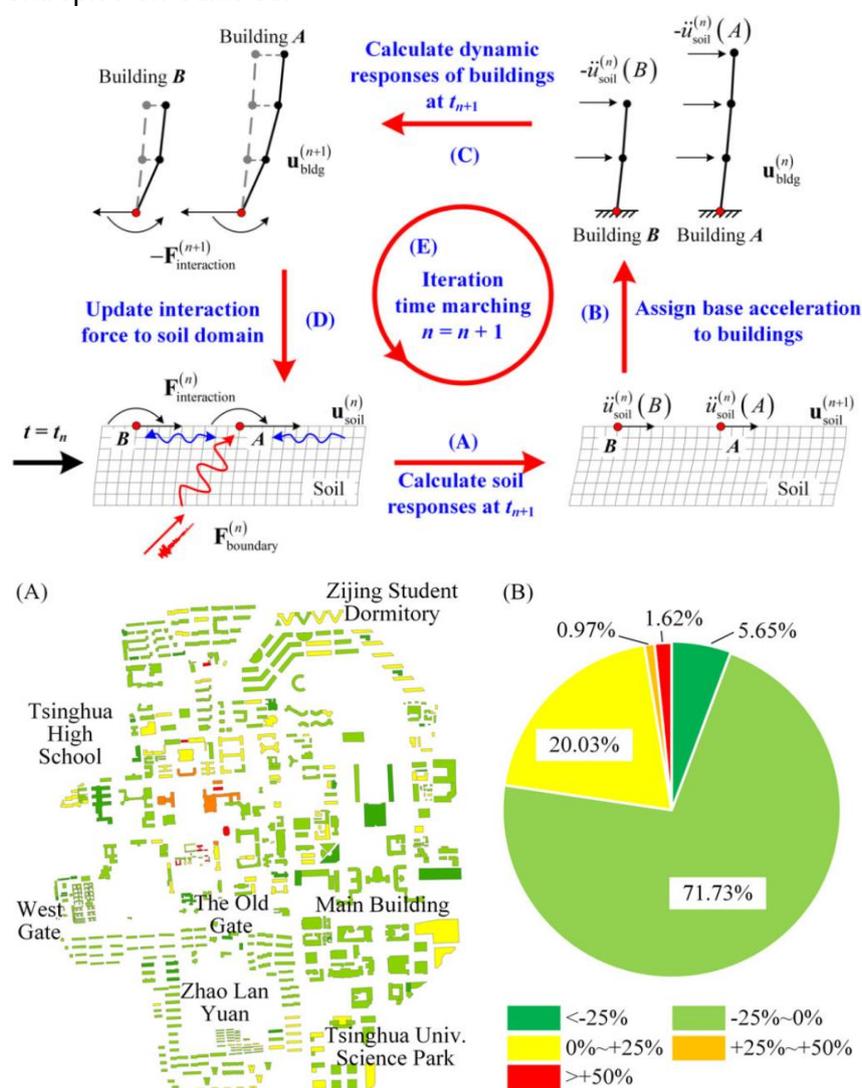


Figura 5 Método propuesto para considerar la interacción entre el sitio y la ciudad (arriba). Distribución de la máxima distorsión de entrepiso de los edificios de la Universidad de Tsinghua, China (abajo). Fuente: Riaño et al., (2021).

#### 2.3.4. Revisión sobre el comportamiento sísmico del suelo – aplicado a reservorios

##### **Iguavil & Pocco (2023): “Propuesta de mejoramiento de suelo a fin de mitigar los efectos de las ondas sísmicas en un estrato intermedio de suelo blando mediante un análisis lineal equivalente para asegurar la cimentación de un reservorio de agua en el departamento de Cajamarca”**

El objetivo de esta investigación es reducir las amplitudes de las ondas sísmicas en suelos blandos. Para ello se propone la mejora del suelo blando mediante pilas de agregado compactado. Las estructuras del suelo sin mejorar y con pilas de agregado compactado se pueden observar en la Figura 6. Ambas estructuras fueron modeladas en el software Deepsoil, en el cual también se realizó el análisis dinámico no lineal unidimensional. La aceleración máxima del registro empleado para los análisis dinámicos fue de 0.08g. Los resultados muestran que la amplificación de las ondas en el suelo mejorado se reduce un 22%.

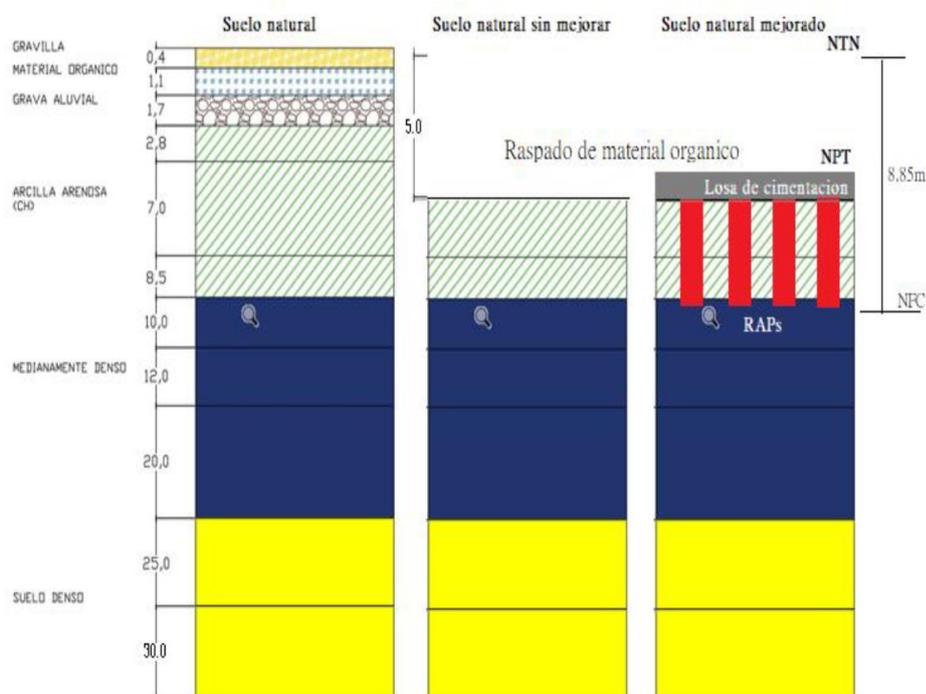


Figura 6 Estructuras del suelo natural sin mejorar y del suelo natural mejorado. Fuente: Iguavil & Pocco (2023)

#### 2.3.5. Revisión sobre el comportamiento sísmico del suelo – aplicado a escala urbana

##### **Kusakabe et al., (2021): “Development of regional simulation of seismic-motion and induced liquefaction enhanced by GPU computing”**

Con la finalidad de estudiar la respuesta sísmica de suelo licuables, Kusakabe et al., (2021) desarrollaron una metodología para la simulación regional del movimiento en suelos licuables. Para aplicar esta metodología, se generó un modelo 3D de elementos finitos que considera múltiples capas de suelo en una región de 240 x 240 m<sup>2</sup> (estas capas se definen a partir de modelos de velocidades y de modelos digitales de la superficie). Luego, seleccionaron el registro sísmico para la simulación numérica (sismo de Kobe 1995).

Considerando algunos parámetros para describir el comportamiento no lineal de suelos licuables y el comportamiento no lineal de estructuras, realizaron simulaciones sísmicas del modelo de elementos finitos utilizando elementos sólidos tridimensionales y computación acelerada por unidades de procesamiento de gráficos (GPUs). A partir de los resultados de la simulación, realizaron un post-procesamiento para obtener el exceso de presión de poros y escoger la mejor propuesta para disminuir el riesgo sísmico en los suelos licuables. Cabe resaltar que en esta investigación se demostró que realizar la computación acelerada por GPUs de un modelo de  $\sim 10^8$  DOF es 10 veces más rápida que solo usar unidades centrales de procesamiento (CPUs). La Figura 7 muestra el modelo generado para este estudio y el exceso de presión de poros en un suelo licuable ante un escenario sísmico.

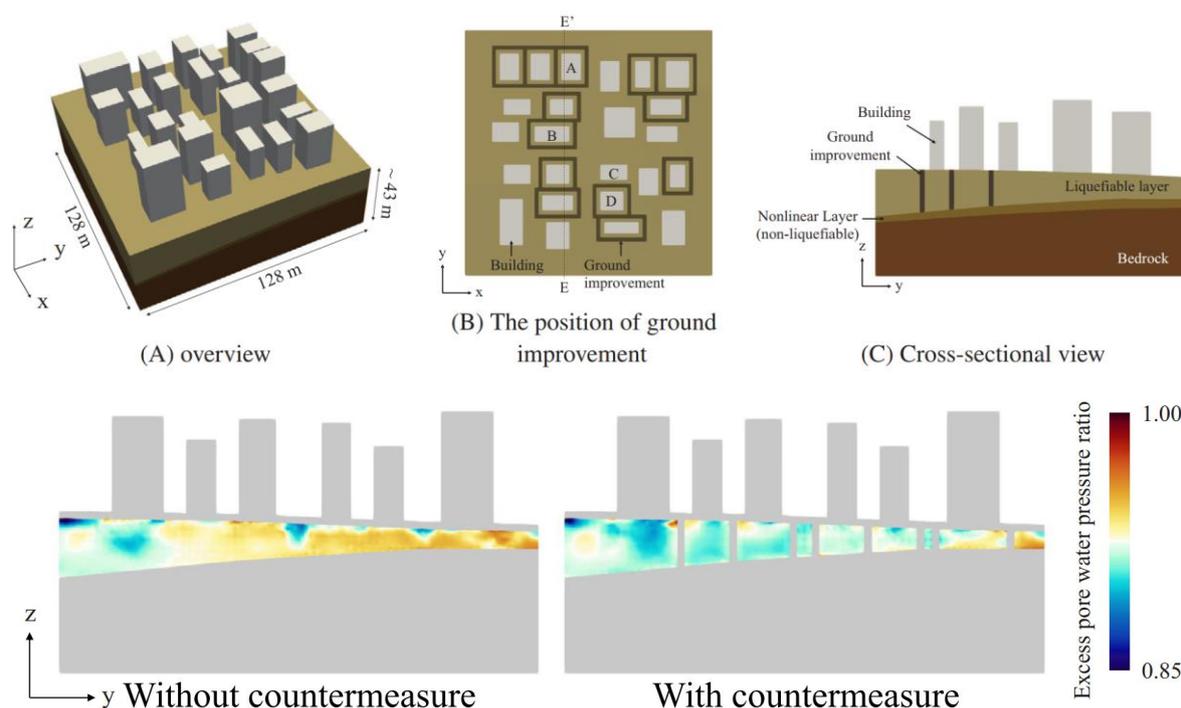


Figura 7 Modelo generado para estimar la respuesta en suelos licuables (arriba). Exceso de presión de poros como resultado de la simulación numérica del suelo licuable sin mejoramiento y con mejoramiento (abajo). Fuente: Kusakabe et al., (2021).

### Falcone et al., (2018): “Site response analysis of an urban area: A multi-dimensional and non-linear approach”

Esta investigación examina las estimaciones numéricas de la respuesta sísmica mediante el enfoque de elementos finitos unidimensional y multidimensional. Para ello, Falcone et al., (2018) generaron un modelo de  $1,400 \times 600 \text{ m}^2$  de área con 423 mil elementos finitos para la zona urbana de Bovino, Italia. Luego, seleccionaron el registro sísmico para la simulación numérica (sismo de Calabria 1978). Considerando perfiles de velocidades de ondas, el modelo constitutivo Hardening-Soil y elementos tetraédricos de 10 nodos, realizaron simulaciones numéricas para estimar la respuesta sísmica del suelo utilizando el programa PLAXIS 3D. Finalmente, concluyen que es recomendable realizar simulaciones 3D pues hay efectos que no se pueden predecir en análisis simplificados 2D o 1D. Estos efectos se pueden apreciar en la comparación de resultados mostrados en la parte derecha de la Figura 8.

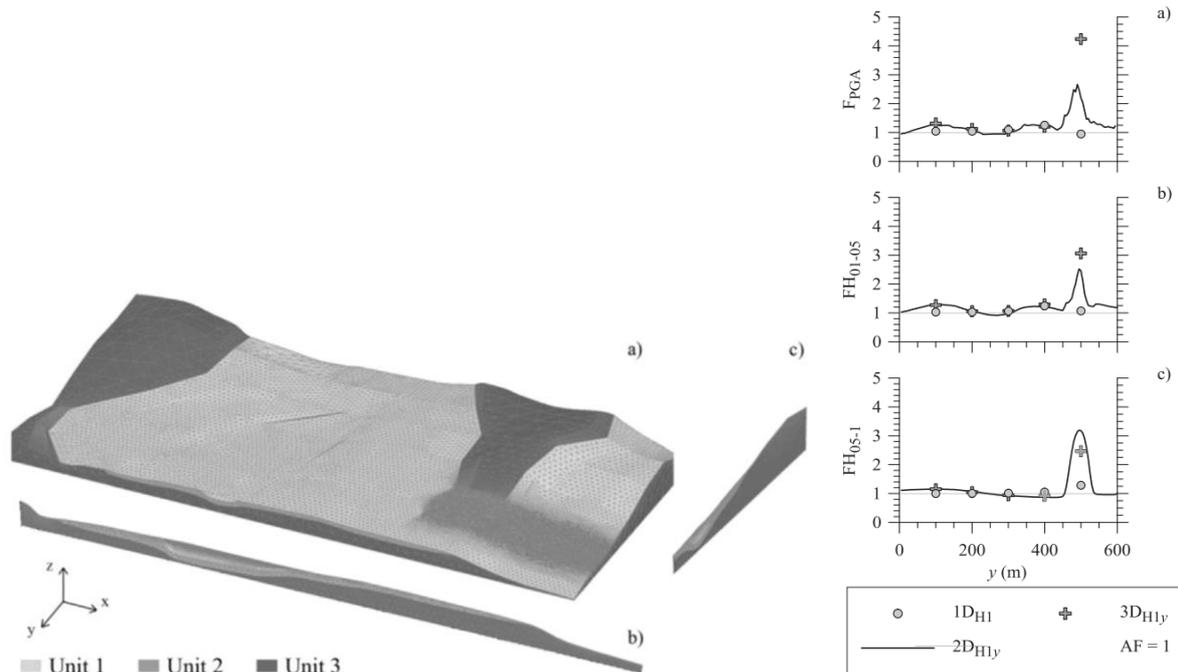


Figura 8 Modelos numéricos 2D y 3D utilizados para el análisis (izquierda) y factores de amplificación obtenidos del análisis numérico de modelos 1D, 2D y 3D (derecha). Fuente: Falcone et al., (2018).

**Smerzini et al., (2017): “Evaluation of earthquake ground motion and site effects in the Thessaloniki urban area by 3D finite-fault numerical simulations”**

En esta investigación se estudió el movimiento sísmico en el área urbana de Tesalónica, Grecia utilizando un enfoque numérico de elementos espectrales. Para ello, Smerzini et al., (2017) crearon un modelo de elementos espectrales de gran escala que representa el área de Tesalónica de 82 x 64 km<sup>2</sup> (ver Figura 9). En este estudio utilizaron el programa de código abierto [SPEED](#) para estimar la propagación de ondas desde la ruptura.

Luego, compararon los resultados con las estimaciones a partir de leyes de atenuación y concluyen que existe una buena relación entre los resultados de las simulaciones y las estimaciones experimentales. Además, a partir de los resultados de la simulación numérica estimaron la amplificación en algunos sitios de la ciudad utilizando el método estándar de la razón espectral (Standard Spectral Ratio, SSR). Adicionalmente, utilizaron un modelo no lineal del suelo en base a los enfoques de modelos equivalentes 1D (Kramer, 1996). Finalmente realizaron mapas de aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos.

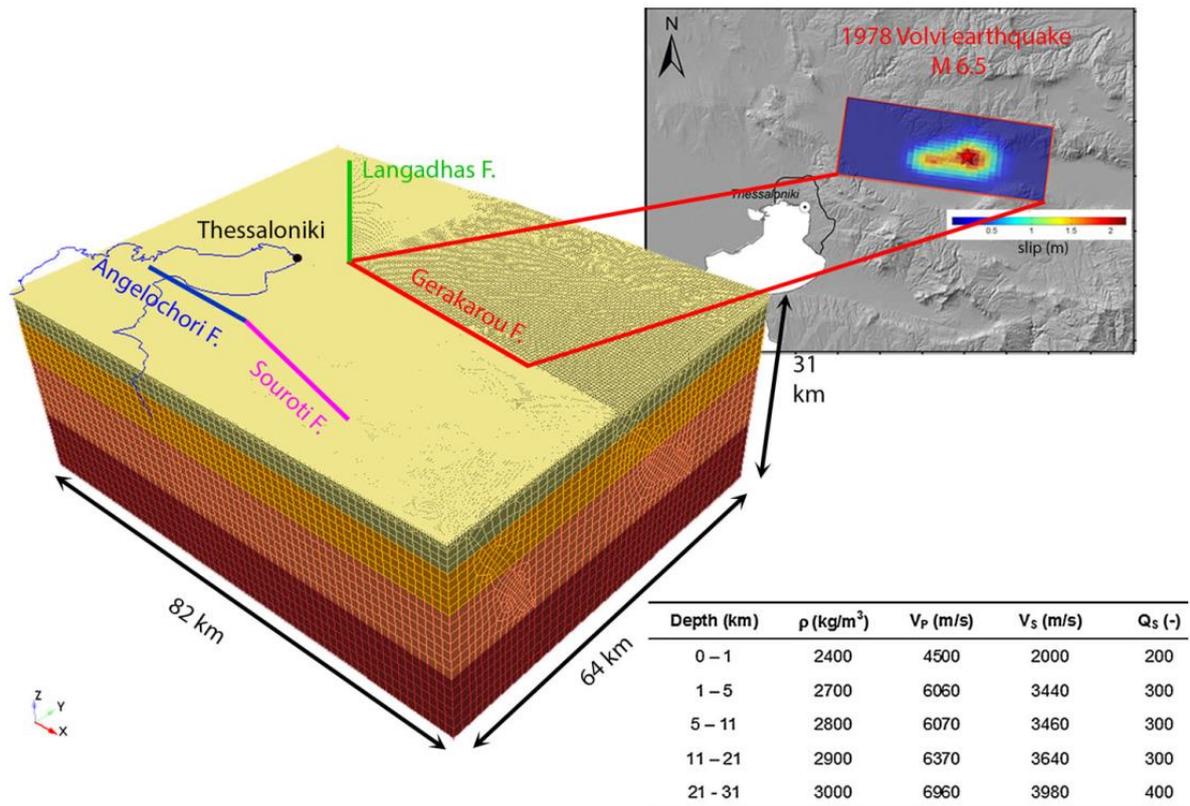


Figura 9 Modelo numérico 3D y falla sísmica considerada para la simulación numérica en el área urbana de Tesalónica, Grecia. Fuente: Smerzini et al., (2017).

### 2.3.6. Revisión sobre computación de alto rendimiento aplicado a simulaciones de terremotos

#### **Ichimura et al., (2022): “152K-computer-node parallel scalable implicit solver for dynamic nonlinear earthquake simulation”**

Con la finalidad de analizar la amenaza y el potencial desastre de terremotos, Ichimura et al., (2022) generaron un modelo 3D de  $256 \times 205 \times 100 \text{ km}^3$  para la región de Kanto, Japón (ver Figura 10). El modelo también considera capas de suelo blando, edificios y estructuras subterráneas utilizando un tamaño de malla que varía de 0.125m a 64m. Luego, seleccionaron el registro sísmico a considerar (sismo de Kobe 1995). Finalmente, realizaron la simulación numérica de la propagación de ondas sísmicas desde la falla sísmica, pasando por los estratos del suelo y hasta la ciudad donde están las estructuras.

Esta investigación es una de las primeras que realiza el análisis totalmente acoplado de un modelo de  $324 \times 10^9$  DOF. El método computacional propuesto en esta investigación para realizar la simulación numérica es 25 veces más rápido que el convencional, obteniendo resultados en menos de 5 horas.

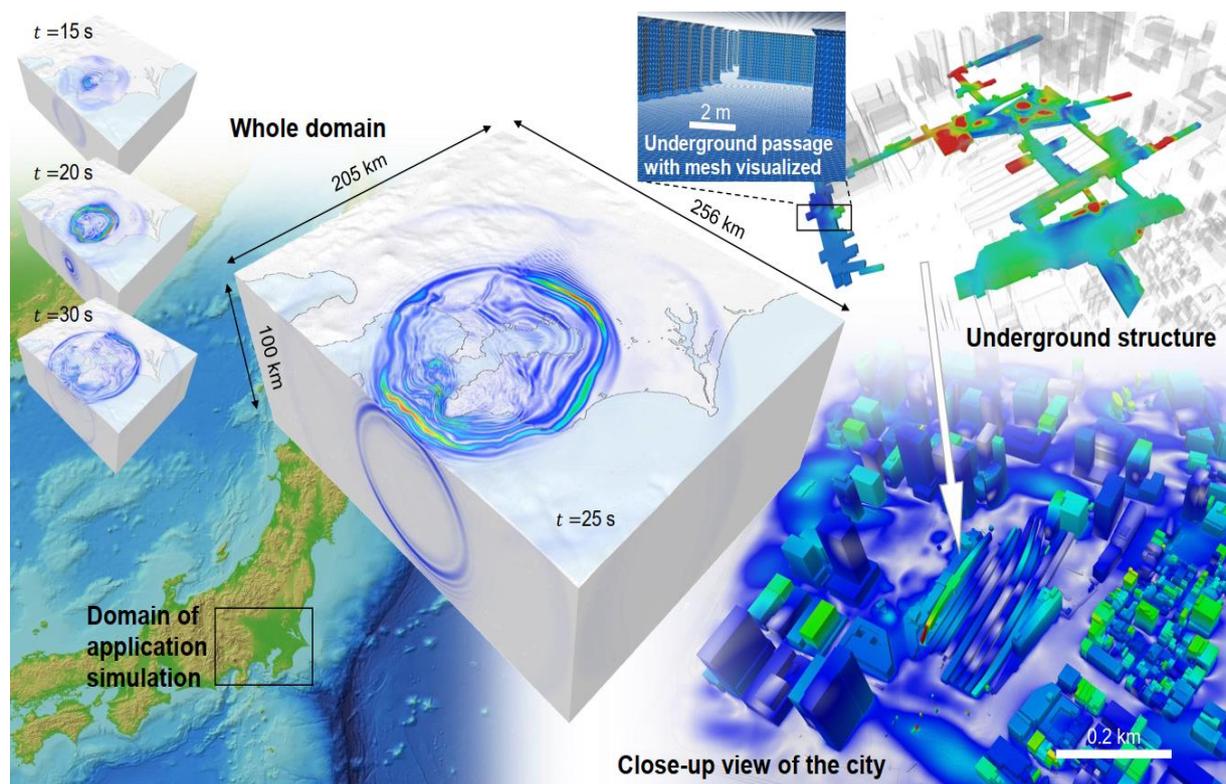


Figura 10 Modelo de elementos finitos de  $324 \times 10^9$  DOF para la región de Kanto, Japón. En la parte izquierda se muestra la propagación de ondas en tres instantes de tiempo: 15, 20 y 30 segundos. Fuente: Ichimura et al., (2022).

### Ichimura et al., (2018): “A fast scalable implicit solver for nonlinear time-evolution earthquake city problem on low-ordered unstructured finite elements with artificial intelligence and transprecision computing”

Para abordar el problema que ocurre debido a terremotos en áreas urbanas, Ichimura et al., (2018) propusieron un método que utiliza inteligencia artificial y computación de precisión numérica variable. Como aplicación generaron un modelo tridimensional de  $1,024 \times 1,024 \times 370 \text{ m}^3$  para la metrópolis de Tokio, Japón (ver Figura 11). El modelo generado de  $16 \times 10^9$  DOF también considera capas de suelo blando, edificios y estructuras subterráneas utilizando un tamaño de malla mínimo de 0.25m. Luego, seleccionaron el registro sísmico a considerar (sismo de Kobe 1995). Finalmente, realizaron simulaciones numéricas de la propagación de ondas sísmicas, pasando por los estratos del suelo y hasta la ciudad donde están las estructuras. El método que proponen para realizar la simulación numérica es 25.3 veces más rápido que el convencional, demostrando que la inteligencia artificial puede ser utilizada para mejorar el rendimiento de las simulaciones.

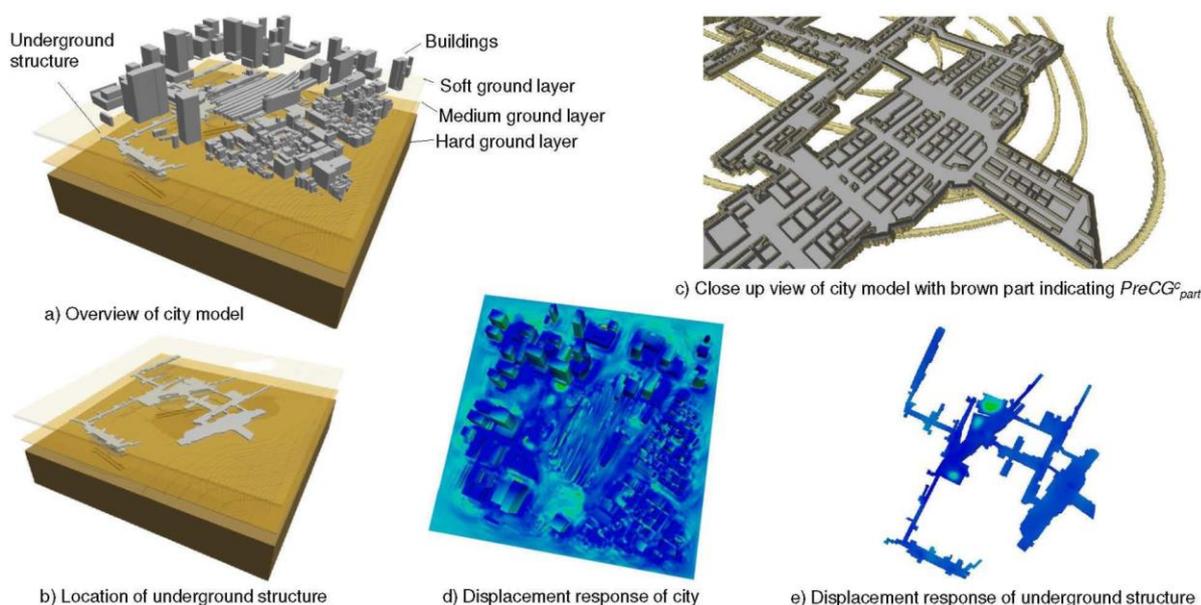


Figura 11 Modelo 3D considerado para la simulación numérica y respuesta sísmica de la ciudad en términos de desplazamiento. Fuente: Ichimura et al., (2018).

### Palacios et al., (2024): “Simulating earthquake-induced wave propagation with GPU-accelerated computing”

Con la finalidad de simular la propagación de ondas sísmicas en un medio heterogéneo y de geometría compleja, Palacios et al., (2024) presentaron el programa gQuake, el cual está diseñado para simulaciones numéricas de modelos 3D utilizando computación de alto rendimiento y computación acelerada por GPUS. En esta investigación se validan los resultados de la simulación numérica obtenidos del programa comparando con soluciones analíticas. Para ello, generaron un modelo de  $32 \times 32 \times 16 \text{ km}^3$  y aplicaron una fuerza dinámica que representa a una falla sísmica. El error relativo máximo encontrado es de alrededor de 4%, el cual indica la efectividad del programa para este tipo de simulaciones (ver Figura 12).

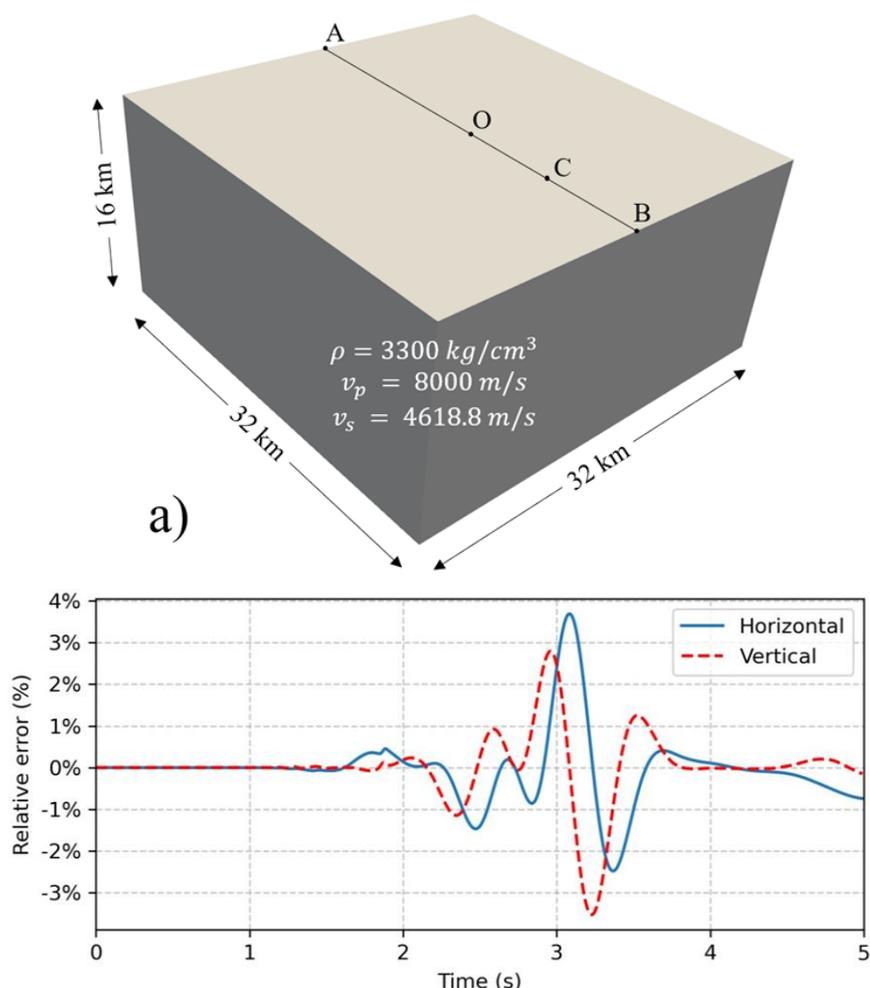


Figura 12 Modelo 3D considerado para la validación de los resultados (arriba). Error relativo del desplazamiento en comparación con la solución analítica (abajo). Fuente: Palacios et al., (2024).

### 2.3.7. Revisión de bibliografía sobre estabilidad de taludes

#### **Tardeo & Zanabria (2016): “Análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos en la zona de Huayllapampa del distrito de Cuenca - Huancavelica”**

En este estudio se genera un modelo de elementos finitos bidimensional en el software QUAKE/W – GeoStudio, el cual fue empleado para realizar un análisis sísmico no lineal mediante el método lineal equivalente. Asimismo, se empleó SLOPE/W para realizar el análisis de estabilidad y determinar las superficies de falla del talud.

Como resultados se obtuvieron los factores de seguridad del talud en función del tiempo (ver Figura 13). Del análisis se concluyó que el talud es inestable para el sismo analizado debido a que el factor de seguridad dinámico presenta valores menores al valor permisible ( $FS = 1.25$ ).

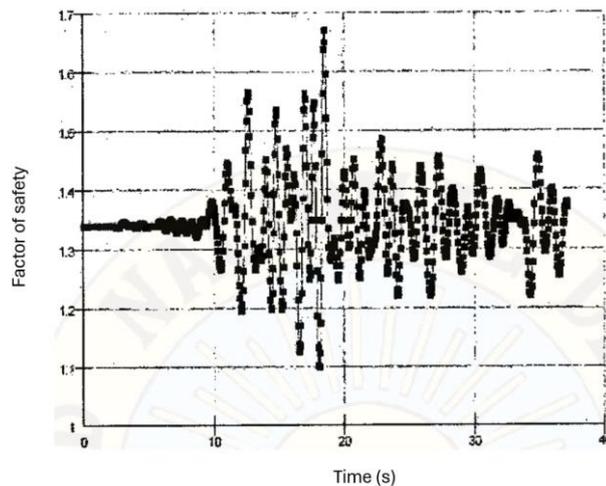


Figura 13 Factor de seguridad del talud en función del tiempo. Fuente: Tardeo & Zanabria (2016).

### 2.3.8. Revisión de bibliografía sobre estructuras enterradas - túneles

#### **Vergaray (2022): “Análisis sísmico de estructuras enterradas”**

Se presenta un modelo de elementos finitos bidimensional de un túnel, este modelo fue realizado con el software Plaxis2D (ver Figura 14). Además, se realizó un análisis dinámico no lineal, para lo cual se empleó una variante del modelo constitutivo Hardening-Soil (HS Small) y así representar mejor el comportamiento dinámico del suelo.

Para el túnel se empleó el modelo elástico lineal. Las propiedades de los materiales fueron estimadas a partir de pruebas geofísicas. Los registros sísmicos empleados fueron ajustados a un espectro objetivo. En los resultados se presentaron las deformaciones no lineales en el suelo y en los elementos estructurales del túnel (ver Figura 14).

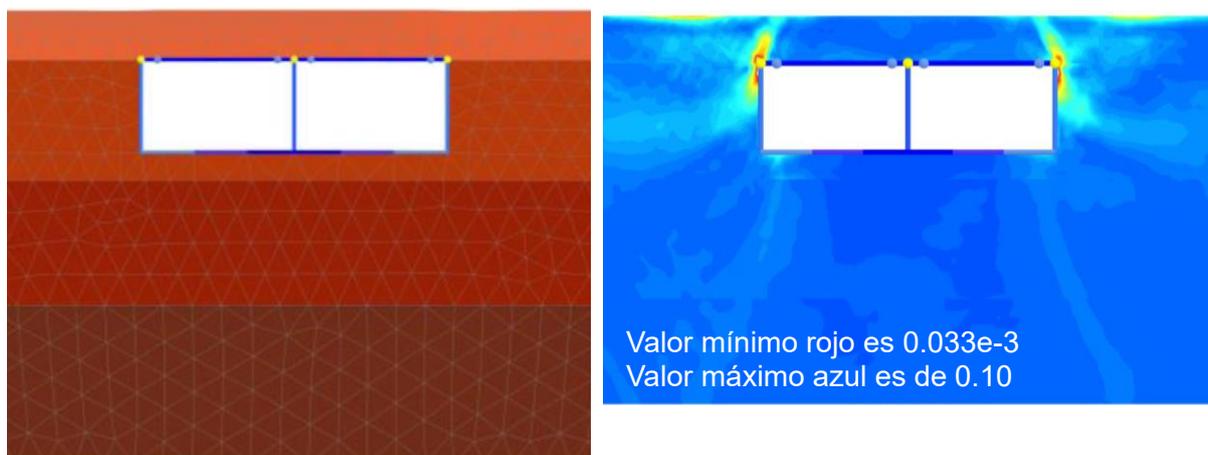


Figura 14 Modelo de elementos finitos 2D de túnel y suelo (izquierda). Deformaciones unitarias producidas en el suelo (derecha). Fuente: Vergaray (2022)

### 2.3.9. Revisión de bibliografía sobre estructuras enterradas - tuberías

#### **Alencastre (2023): “Análisis de deflexiones y esfuerzos en tuberías de acero de pared delgada enterradas bajo vías de acarreo de camiones mineros por el método de los elementos finitos”**

En esta investigación se generan modelos paramétricos de elementos finitos tridimensionales de tuberías enterradas, el modelo considera diferentes capas laterales, inferiores y superiores del suelo que rodean a las tuberías (ver Figura 15). Se propuso un modelo de elementos finitos que considera la no linealidad del material del suelo. Debido a que estas tuberías se encuentran enterradas en cruces de caminos mineros, se consideraron las cargas superficiales de vehículos con una carga bruta máxima de 625 toneladas para los análisis estáticos no lineales realizado en el software Abaqus. Finalmente se obtuvieron los esfuerzos y deformaciones de los modelos paramétricos (ver Figura 16).

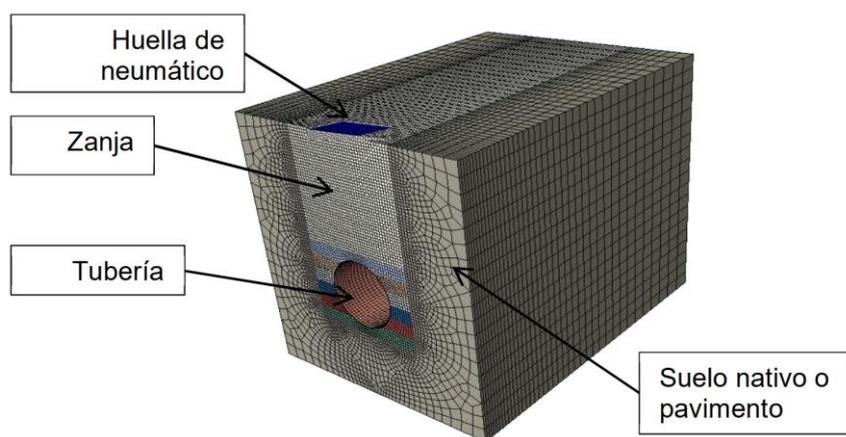


Figura 15 Modelo de elementos finitos tridimensional de la tubería y capas del suelo. Fuente: Alencastre (2023)

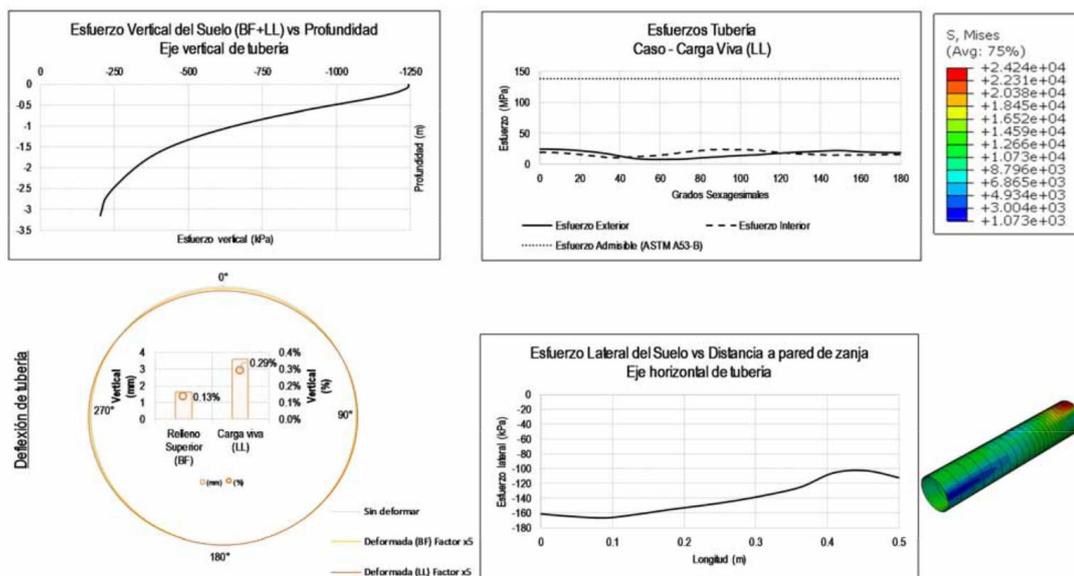


Figura 16 Resultados de esfuerzos y deformaciones para suelo y tubería. Fuente: Alencastre (2023)

### 3. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS REQUERIDAS

En este capítulo, abordaremos los métodos y herramientas comúnmente empleados en la simulación numérica de problemas de gran escala. En primer lugar, se detallan los métodos numéricos, incluyendo el método de elementos finitos, algoritmos para la generación de modelos de elementos finitos, formatos de almacenamiento y técnicas para resolver sistemas de gran escala que involucran hasta  $\sim 10^4$  pasos de tiempo.

En segundo lugar, se describen los lenguajes de programación para implementar los métodos numéricos descritos para realizar este tipo de simulaciones numéricas. Además, al tratarse de problemas de gran dimensión, también se describe los métodos computacionales necesarios para reducir el tiempo de cómputo de estas simulaciones. Finalmente, se proporciona un análisis de las características y costos asociados a la adquisición y operación de diversos softwares y hardwares utilizados en este contexto.

#### 3.1. Métodos numéricos

##### 3.1.1. Método de elementos finitos

Actualmente, el método de elementos finitos se utiliza extensamente en softwares de computadora para resolver una variedad de problemas de ingeniería. El método consiste en idealizar un problema físico como un modelo matemático. De forma práctica, la idealización del problema físico consiste en dividir el volumen de la geometría en elementos discretos. El modelo matemático definido está sujeto a ciertas suposiciones, las cuales conducen a ecuaciones diferenciales, éstas se resolverán mediante el análisis de elementos finitos. La precisión de la solución dependerá del nivel de refinamiento y el tipo de elemento finito que se defina para el modelo matemático en mención. La solución mediante el método de elementos finitos involucra definir lo siguiente (Bathe, 1996):

- Elección del elemento finito: tetraedro, hexaedro, etc.
- Densidad de la malla: tamaño de elementos finitos.
- Definición de las condiciones de borde (Dirichlet).
- Definición de las condiciones de carga (Neumann).

Luego, se realiza la solución del problema para obtener los desplazamientos y esfuerzos en los nodos de los elementos finitos. Es importante resaltar que el método no se limita a la solución de problemas lineales estáticos, ya que es posible realizar análisis dinámicos no lineales de múltiples problemas (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

Como ha podido observarse, el método no solo involucra la solución del problema físico, sino que también es importante generar el modelo numérico que represente con alta fidelidad dicho problema. En ese sentido, es necesario desarrollar algoritmos y herramientas para la generación de un modelo discretizado en elementos finitos.

##### 3.1.2. Generación de modelo de elementos finitos

Para el análisis realístico mediante el método de elementos finitos es necesario crear modelos que representen las geometrías complejas del área de estudio que se requiere analizar. La discretización de estas geometrías se suele realizar con la triangulación de Delaunay. Este algoritmo demanda un alto costo computacional cuando la escala del modelo requiere de miles de elementos finitos.

Para abordar este desafío, se implementaron técnicas de computación de alto rendimiento en la generación de modelos de elementos finitos. En un estudio realizado por Ichimura et al. (2016) se propuso una metodología para la construcción de un modelo de elementos finitos de gran escala utilizando elementos tetraédricos. Esta metodología permite obtener una mayor densidad de elementos finitos en las interfaces de las capas que componen a la geometría en análisis lo que resulta en un mallado más eficiente. En la Figura 17 se puede observar el proceso que se lleva a cabo para generar una malla eficiente de elementos finitos. En (a) se define la grilla y las superficies de las capas del modelo. Luego, en (b) se simplifica la geometría de las superficies para mantener la calidad de la malla. En (c) se generan elementos tetraédricos en las grillas que intersecan a las superficies, el resto de los elementos son hexaedros. Finalmente, en (d), los elementos hexaédricos se descomponen en tetraedros. Adicionalmente, en (e) se realiza un particionamiento del dominio del modelo, esto se hace con el objetivo de realizar análisis en paralelo de cada dominio mediante técnicas de computación de alto rendimiento.

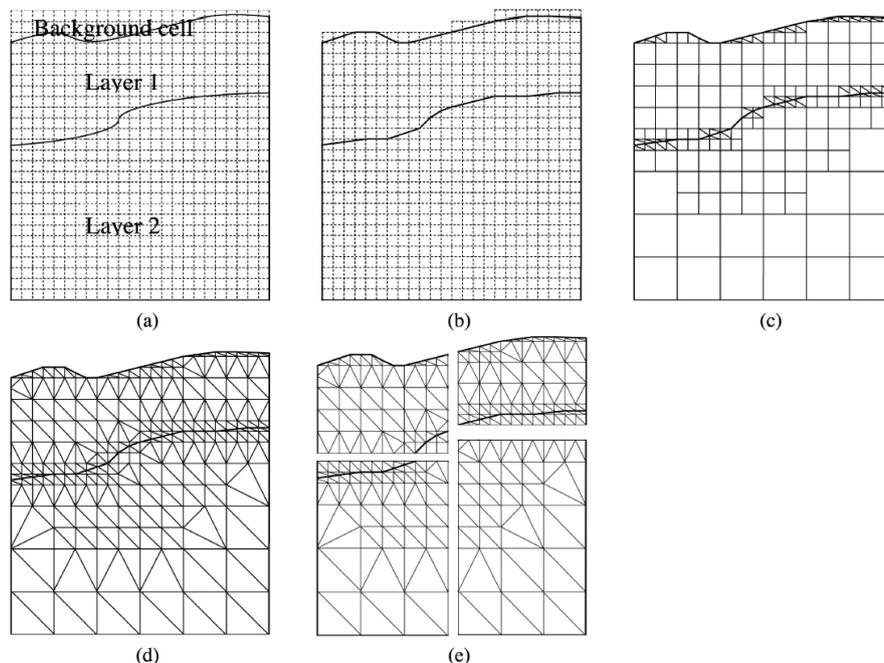


Figura 17 Construcción de un modelo de elementos finitos. Fuente: Ichimura et al. (2016)

### 3.1.3. Formatos de almacenamiento

Los modelos de elementos finitos usualmente representan un sistema lineal de ecuaciones que contienen una gran cantidad de coeficientes igual a cero. Si se almacenasen todos estos coeficientes se requerirá una mayor cantidad de memoria de la computadora. En ese sentido, en programas de elementos finitos se suele aprovechar que existe una gran cantidad de coeficientes ceros para almacenar solo los coeficientes diferentes de cero en una matriz dispersa.

El método de almacenamiento más popular para el almacenamiento de matrices dispersas es el formato Compressed Row Storage (CRS). Este esquema es particularmente eficiente para realizar operaciones de multiplicación de matriz-vector (operaciones que son necesarias al resolver sistemas lineales de gran dimensión), ya que permite acceder de manera rápida a los coeficientes diferentes de cero de la matriz.

Por otro lado, existe otro formato que utiliza una longitud fija de las filas para representar el sistema disperso, este formato es llamado ELLpack. En la multiplicación matriz-vector, el formato ELLpack también permite un acceso rápido a los coeficientes diferentes de cero de cada fila. Sin embargo, puede haber un desperdicio de espacio si la longitud máxima de la fila es significativamente mayor que la mayoría de las filas. La Figura 18 muestra esquemáticamente los formatos de almacenamiento CRS y ELL para matrices dispersas.

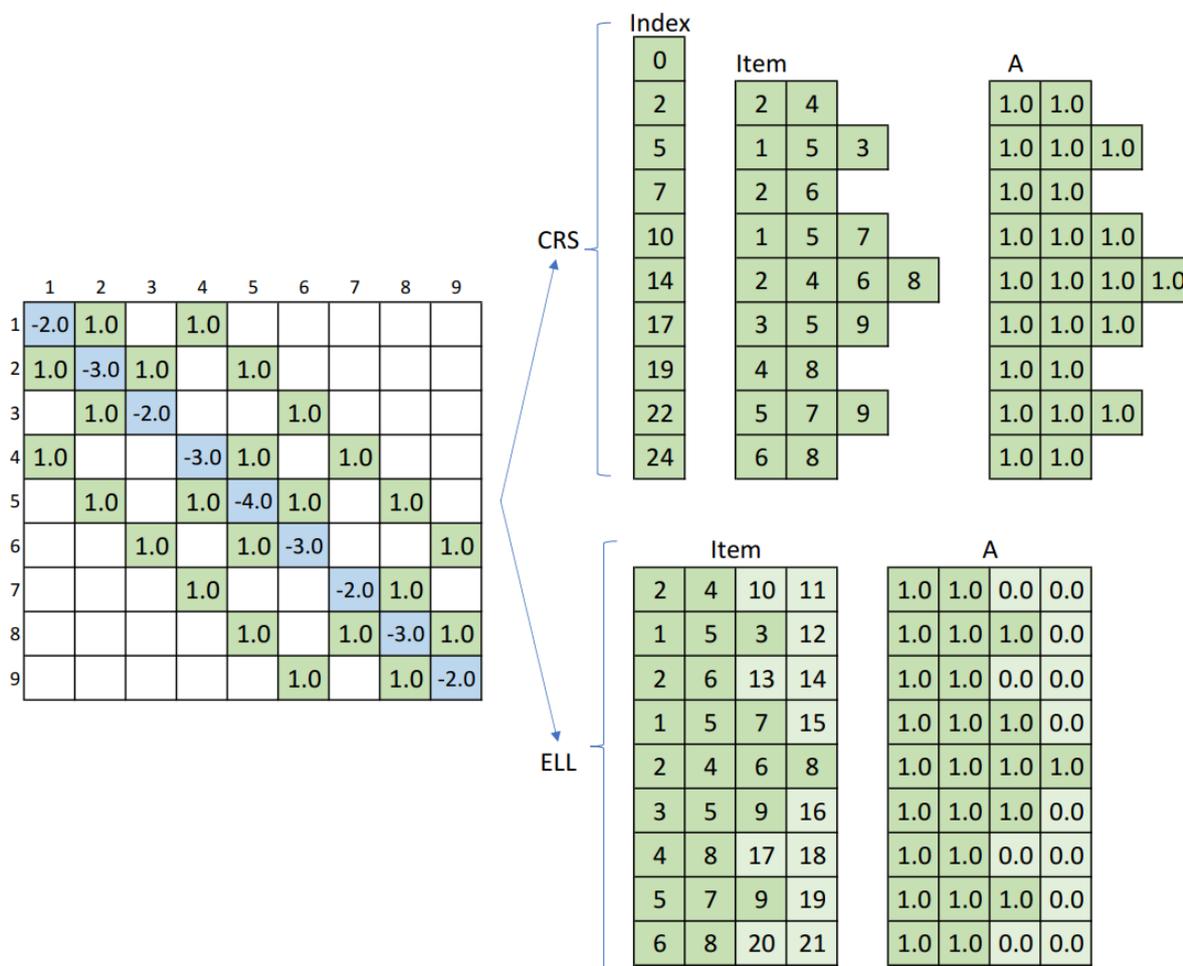


Figura 18 Formatos de almacenamiento de sistemas dispersos CRS y ELL. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.4. Método de particionamiento

Si bien es cierto que al utilizar un formato de almacenamiento eficiente como CRS o ELL la cantidad de memoria requerida disminuye, este requerimiento de memoria para realizar simulaciones numéricas a escala urbana aún es alto.

Para abordar este problema, existen métodos de particionamiento que dividen un dominio de gran dimensión en subdominios más pequeños, lo que facilita la manipulación y la asignación eficiente de recursos computacionales. Estos métodos buscan dividir el dominio de manera que minimicen la comunicación entre los subdominios y optimicen la carga de trabajo en paralelo. METIS es un ejemplo de una herramienta ampliamente utilizada para el

particionamiento y es particularmente eficaz en problemas de elementos finitos a escala urbana (Ichimura et al., 2018).

La Figura 19 muestra un ejemplo de particionamiento de un dominio rectangular en tres subdominios. En este caso, se anticipa que los resultados del análisis utilizando tres subdominios se obtendrán en aproximadamente un tercio del tiempo requerido al emplear únicamente un dominio.

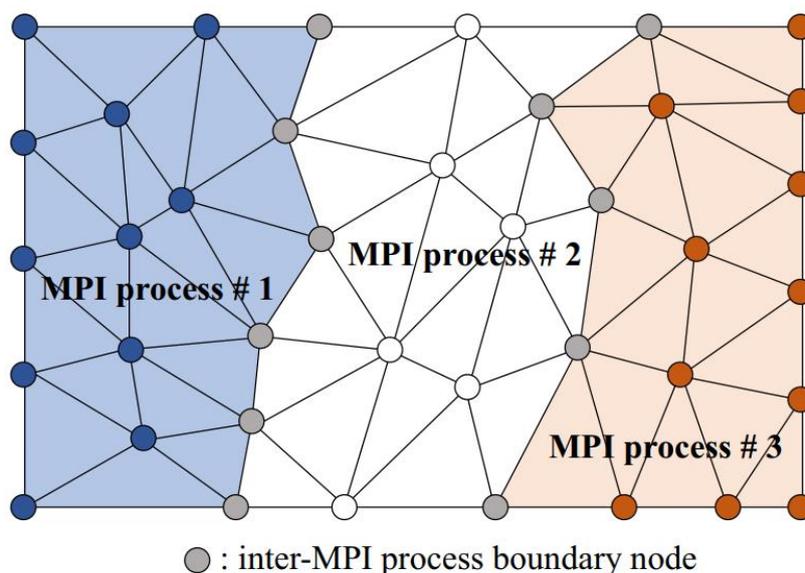


Figura 19 Ejemplo de particionamiento de un dominio rectangular en tres subdominios. Estos subdominios son asignados a procesos para la computación en paralelo. Fuente: (Kusakabe et al., 2021).

### 3.1.5. Integración en el tiempo

Los métodos de integración numérica son usados para el análisis de la respuesta dinámica del suelo y estructuras sujetas a movimientos sísmicos. Estos métodos consisten en determinar la historia en el tiempo de la respuesta en términos de desplazamientos, velocidades y aceleraciones. Para ello, se parte de la definición de la ecuación diferencial que rige el comportamiento durante un evento sísmico, como se describe en Shibata, (2010):

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = -M\ddot{y}_g$$

Esta ecuación se puede resolver mediante los métodos de integración numérica. Un método comúnmente utilizado por softwares de ingeniería para análisis dinámicos es conocido como el método de Newmark- $\beta$ , el cual se define mediante las siguientes fórmulas (Shibata, 2010):

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{n+1} &= -M^{-1}C\dot{y}_{n+1} - M^{-1}Ky_{n+1} - \ddot{y}_{0n+1} \\ \dot{y}_{n+1} &= \dot{y}_n + \frac{1}{2}(\ddot{y}_n + \ddot{y}_{n+1})\Delta t \\ y_{n+1} &= y_n + \dot{y}_n\Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\ddot{y}_n\Delta t^2 + \beta\ddot{y}_{n+1}\Delta t^2 \end{aligned}$$

Las ecuaciones anteriores nos permiten determinar la respuesta dinámica en términos de aceleraciones ( $\ddot{y}_{n+1}$ ), velocidades ( $\dot{y}_{n+1}$ ) y desplazamientos ( $y_{n+1}$ ) ante un movimiento sísmico ( $\ddot{y}_{0n+1}$ ). A partir de estas ecuaciones podemos interpretar que es necesario conocer las respuestas en un instante de tiempo  $t_n$  para determinar las respuestas en un instante de tiempo posterior  $t_{n+1}$ .

### 3.1.6. Condiciones de borde absorbente

En la simulación numérica de la propagación de ondas sísmicas, la estimación de la interacción suelo-estructura es esencial para la evaluación de la respuesta de estructuras durante terremotos. Un factor importante para una estimación precisa de esta interacción es la eliminación de las ondas reflejadas en el borde del dominio de análisis. En ese sentido, Saouma et al., (2011) introdujeron un método innovador para incorporar condiciones de borde absorbentes. Este método fue propuesto considerando el modelo de Lysmer-Kuhlemeyer e integra un tipo de amortiguamiento radial en campo libre. Además, la implementación de este método en códigos existentes de elementos finitos es simple y directa sin tener que realizar modificaciones considerables. Por lo tanto, este método es más robusto que otros modelos para considerar condiciones de borde absorbentes.

Por otro lado, según Liu et al., (2014) otros métodos pueden eliminar la reflexión de ondas de manera más eficiente en algunos casos como el método de capas perfectamente ajustadas (Perfectly Matching Layer, PML). No obstante, este tipo de métodos consiste en adicionar una capa adicional alrededor del dominio que absorbe las ondas sísmicas incidentes aumentando así la complejidad del modelo y, por lo tanto, el tiempo de cómputo de la simulación numérica. La Figura 20 muestra esquemas de los dos métodos descritos para eliminar los efectos de la reflexión de ondas en simulaciones numéricas.

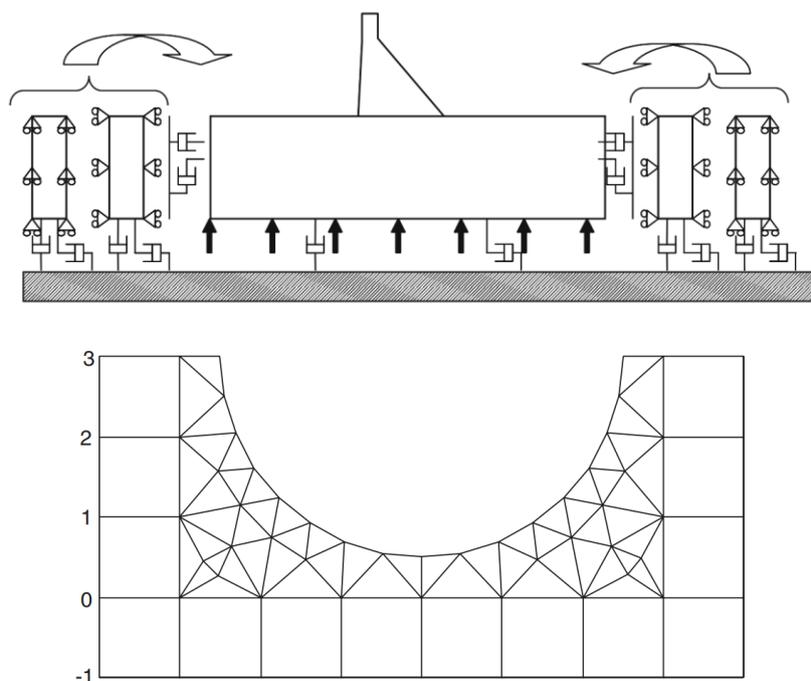


Figura 20 Método propuestos para considerar condiciones de borde absorbentes. Modelo propuesto por Saouma et al., (2011) (arriba) y método PML propuesto por Liu et al., (2014) donde se agrega una capa adicional en el borde (abajo).

### 3.1.7. Solución de sistemas lineales

Utilizando los métodos mencionados anteriormente ahora es posible realizar la simulación numérica de la propagación de ondas sísmicas a escala urbana. No obstante, un factor muy importante a considerar es el tiempo de cómputo de la simulación, especialmente cuando se trata de analizar  $\sim 10^4$  pasos de tiempo para resolver problemas de  $\sim 10^8$  DOF.

Para resolver este tipo de problemas existen dos estrategias principalmente: métodos directos e iterativos. Los métodos directos, como la factorización LU o la eliminación gaussiana, proporcionan soluciones con buena precisión. Sin embargo, su complejidad computacional aumenta considerablemente con el tamaño del problema, haciéndolos inviabilidades para sistemas de gran dimensión.

Por otro lado, los métodos iterativos, como el método del gradiente conjugado, ofrecen una alternativa eficiente para resolver problemas de gran dimensión. Estos métodos aproximan la solución gradualmente, requiriendo menos recursos computacionales por iteración. Además, se adaptan perfectamente a la computación paralela, lo que permite distribuir el procesamiento en múltiples procesos y acelerar significativamente la obtención de la solución.

El preconditionamiento es una técnica que se utiliza para mejorar la convergencia del método del gradiente conjugado. Consiste en transformar el sistema original en uno equivalente con una matriz mejor condicionada. Esta transformación facilita la búsqueda de la solución, ya que las direcciones de búsqueda del gradiente conjugado se vuelven más eficientes.

La Figura 21 muestra la iteración realizada en el método del gradiente conjugado que utiliza un preconditionamiento de Jacobi por bloques para resolver el sistema dado por  $A\delta u = f$ .  $\epsilon$  y  $B$  son la tolerancia y la matriz de preconditionamiento, respectivamente. En este método, la multiplicación matriz-vector  $Ap$  es la operación que requiere mayor tiempo de cómputo pues  $A$  representa el sistema lineal de gran dimensión.

1.  $\mathbf{r} = A\delta\mathbf{u} - \mathbf{f}$
2.  $\beta = 0$
3.  $i = 1$
4. while  $\|\mathbf{r}\|/\|\mathbf{f}\| > \epsilon$  do
  - $\mathbf{z} = B^{-1}\mathbf{r}$
  - if  $i > 1$ :  $\mathbf{p} \leftarrow (\mathbf{z}, \mathbf{q})/\rho$
  - $\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{z} + \beta\mathbf{p}$
  - $\mathbf{q} \leftarrow A\mathbf{p}$
  - $\rho \leftarrow (\mathbf{z}, \mathbf{r})$
  - $\alpha \leftarrow \frac{\rho}{(\mathbf{p}, \mathbf{q})}$
  - $\mathbf{q} \leftarrow -\alpha\mathbf{q}$
  - $\mathbf{r} \leftarrow \mathbf{r} + \mathbf{q}$
  - $\delta\mathbf{u} \leftarrow \delta\mathbf{u} + \alpha\mathbf{p}$
  - $i = i + 1$

Figura 21 Algoritmo para el método del gradiente conjugado para resolver el sistema lineal de gran dimensión  $A\delta u = f$ . Fuente: Palacios et al., (2024)

### 3.1.8. Solución de sistemas no lineales

Los problemas asociados con la propagación de ondas sísmicas pueden volverse no lineales, especialmente en medios de geometría compleja como aquellos que incluyen discontinuidades geológicas o heterogeneidades. Esto significa que las soluciones no se pueden encontrar de manera directa y analítica, sino que deben aproximarse utilizando métodos numéricos adicionales a los que se ha mencionado anteriormente.

Existen diversos métodos para resolver sistemas de ecuaciones no lineales, entre ellos destaca el método iterativo Newton-Raphson. Este método es altamente efectivo para la convergencia rápida hacia la solución, especialmente cuando se proporciona una buena estimación inicial. Esto permite obtener soluciones precisas incluso en problemas altamente no lineales y complejos, lo que es crucial para comprender la propagación de ondas sísmicas en diferentes tipos de suelo y como se amplifica la respuesta sísmica de estructuras.

## 3.2. Lenguajes de programación

Para abordar problemas computacionales, es esencial contar con programas capaces de resolverlos. Sin embargo, en ocasiones nos encontramos con situaciones particulares en las cuales no existen herramientas específicas. En tales casos, los ingenieros deben desarrollar sus propias herramientas computacionales. Estas herramientas son una colección de instrucciones o métodos que son conocidos como algoritmos. Para poder expresar estas instrucciones en programas o herramientas computacionales es necesario emplear lenguajes de programación (Kochan, 2015). A continuación, se mencionarán tres lenguajes de programación fundamentales para el desarrollo de herramientas para la simulación numérica tridimensional de propagación de ondas sísmicas a escala urbana.

### 3.2.1. Python

Actualmente Python es el lenguaje de programación más popular en el mundo, como se muestra en la Figura 22 (*PYPL PopularitY of Programming Language Index, s/f*), esto debido a las ventajas y características que ofrece al usuario, las cuales se describen a continuación (Lutz, 2017):

- Fácil entendimiento del código y su estructura, lo que permite el mantenimiento y soporte a los códigos que se desarrollen. Además, los usuarios resaltan la calidad de software que presenta Python.
- Debido a su simplicidad, Python permite aumentar la productividad de los desarrolladores. La cantidad de código que se tiene que escribir en Python es mucho menor que la cantidad que se tendría al usar otros lenguajes de programación tradicionales.
- Actualmente Python cuenta con una gran colección de librerías, las cuales cuentan con un soporte continuo que permite que estas se encuentren actualizadas. Estas librerías permiten acceder a funciones, entre las cuales se pueden resaltar las siguientes: operaciones con matrices, creación de gráficos personalizados, resolución de problemas mediante análisis numérico, etc.
- Se puede interactuar con diversos programas mediante Python, entre los cuales se destacan aquellos cuya aplicación se centra en el método de elementos finitos: gQuake, Plaxis 3D, Abaqus, OpenSeesPy, GMSH, ParaView, PMEF y SPEED.

PYPL Popularity of Programming Language

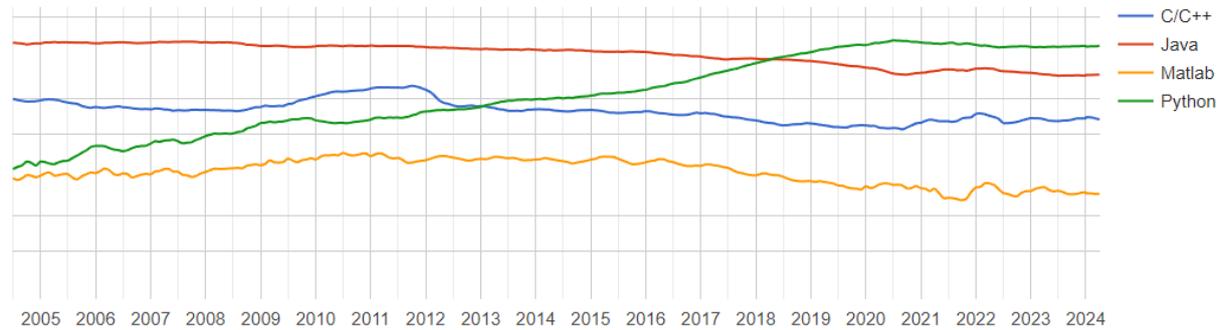


Figura 22 Popularidad de lenguajes de programación desde el año 2005. Fuente: PYPL Popularity of Programming Language Index

No obstante, Python no se desempeña bien en simulaciones de alto costo computacional pues es un lenguaje de bajo rendimiento debido a que es un lenguaje de programación interpretado. Por ello, surge como alternativa de solución utilizar lenguajes de programación compilados, tales como Fortran o C. De acuerdo con Kochan, (2015), las herramientas desarrolladas con estos lenguajes tienden a proporcionar un rendimiento computacional mejorado en comparación con aquellas desarrolladas en Python.

### 3.2.2. Fortran

FORTRAN (Formula Translator) es un lenguaje de programación de alto rendimiento y es ampliamente popular para el desarrollo de programas científicos y de ingeniería (Smith et al., 2014). Entre los problemas relacionados al presente estudio en los que se puede emplear Fortran están los siguientes:

- Generación de malla de elementos finitos.
- Solución de sistema de ecuaciones en problemas discretizados en elementos finitos.
- Programación de procesos iterativos para análisis dinámicos en elementos finitos.
- Lectura y escritura de archivos binarios que representan el modelo y resultados.
- Creación de programas ejecutables que pueden interactuar con otros lenguajes de programación, por ejemplo, Python.

Entre las ventajas principales de Fortran, se destacan las siguientes según Chivers & Sleightholme (2015):

- Es un lenguaje moderno y de alto nivel.
- Es un lenguaje de programación con el cual se puede resolver una gran cantidad de problemas numéricos y no numéricos.
- Está disponible para múltiples sistemas operativos.
- Muchos softwares actuales han sido desarrollados con Fortran (SPEED).
- Al ser un lenguaje compilado los programas desarrollados con Fortran son mucho más eficientes.
- Cuenta con librerías que permiten agilizar procesos mediante la paralelización de estos aprovechando al máximo los recursos computacionales (MPI, OpenMP y OpenACC).

### 3.2.3. C

Al igual que Fortran, C es un lenguaje de programación de alto rendimiento. Con C se pueden resolver los mismos problemas mencionados en el apartado anterior (Preschern, 2022). Sin embargo, es importante resaltar que en C existen librerías optimizadas de métodos numéricos para resolver grandes sistemas de ecuaciones, como los que se presentan en problemas de elementos finitos de millones DOF. Entre estas librerías, se destaca PETSc (the Portable, Extensible Toolkit for Scientific Computation). PETSc proporciona herramientas para la solución de ecuaciones diferenciales parciales de forma eficiente (Balay et al., 2023).

## 3.3. Métodos computacionales

La solución de ecuaciones lineales de gran dimensión se realiza mediante métodos computacionales eficientes que aprovechan la potencia de las computadoras modernas. En esta sección escribiremos sobre las técnicas de paralelismo como uno de los métodos computacionales más eficientes. Estas técnicas explotan la capacidad de las computadoras para ejecutar múltiples operaciones de forma simultánea.

### 3.3.1. Paralelismo a nivel de datos

El paralelismo intra-núcleo, también conocido como SIMD (Single Instruction, Multiple Data) o paralelismo a nivel de datos, es una técnica de paralelismo que explota la capacidad de las CPUs modernas para ejecutar múltiples instrucciones de forma simultánea en un solo núcleo.

El paralelismo intra-núcleo, o SIMD, ha experimentado una evolución significativa desde su aparición en la década de 1960 con las costosas CPUs vectoriales como la CDC 6600. En la década de 1980, estas CPUs se popularizaron, impulsando el rendimiento de las aplicaciones científicas. En la actualidad, CPUs con SIMD avanzadas como AVX-512 ofrecen un ancho de banda y un rendimiento excepcional para aplicaciones exigentes.

SIMD funciona mediante la agrupación de datos en vectores y la aplicación de la misma instrucción a cada elemento del vector. Las CPUs modernas tienen unidades de ejecución SIMD dedicadas a procesar múltiples vectores de forma simultánea. Los conjuntos de instrucciones SIMD proporcionan instrucciones para operaciones comunes en vectores, como suma, resta, multiplicación y división (Ver Figura 23).

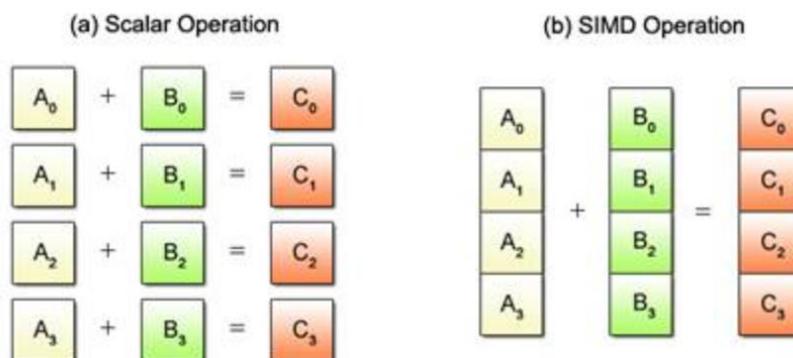


Figura 23 Comparación de operaciones escalares y operaciones SIMD. Fuente: <http://cvut.cz>

### 3.3.2. Paralelismo multinúcleo

El paralelismo multinúcleo es una técnica para mejorar el rendimiento de las computadoras ejecutando tareas en paralelo en diferentes núcleos de la CPU. El uso de CPUs multinúcleo ha convertido esta técnica en una herramienta vital para la simulación numérica a escala urbana asignando diferentes tareas a diferentes núcleos para su ejecución en paralelo. La Figura 24 muestra como una computadora está conectada eficientemente a sus núcleos de procesamiento.

Las ventajas del paralelismo multinúcleo incluyen un mejor rendimiento, eficiencia energética y escalabilidad. Esta técnica es útil no solo para la simulación numérica, sino que también para aplicaciones como procesamiento de video y aprendizaje automático. Sin embargo, no todas las aplicaciones se benefician del paralelismo multinúcleo, y la programación de aplicaciones multinúcleo puede ser compleja.

En ese sentido existen plataformas como OpenMP que facilita la programación paralela en C y Fortran. Esta plataforma proporciona un conjunto de directivas que permiten al programador especificar qué partes del código deben ejecutarse en paralelo. Los programas desarrollados utilizando OpenMP pueden ejecutarse hasta N veces más rápido que las aplicaciones secuenciales, donde N es el número de núcleos del procesador. De esta manera se aprovecha al máximo el hardware disponible.

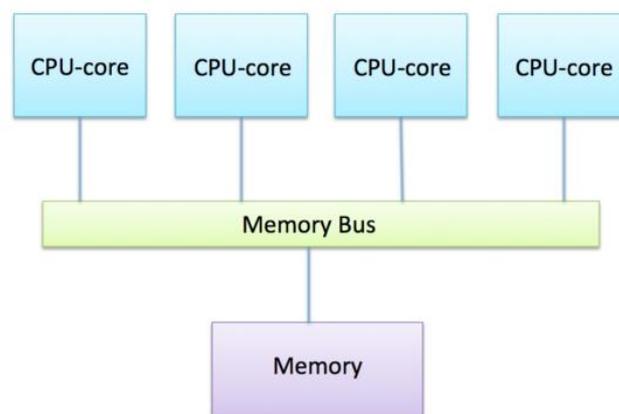


Figura 24 Esquema de computadora con procesador de 4 núcleos que comparten una memoria. Fuente: [futurelearn.com](http://futurelearn.com)

### 3.3.3. Paralelismo de memoria distribuida

El paralelismo de memoria distribuida es una técnica innovadora que permite ejecutar simulaciones numéricas en múltiples computadoras, cada una con su propia memoria local independiente. Esta técnica se complementa con el particionamiento de la simulación en subdominios, donde las tareas de cada subdominio se asignan a distintas computadoras para distribuir la carga de trabajo de manera óptima y maximizar el rendimiento del sistema. La Figura 25 muestra un esquema de un sistema de memoria distribuida. Al dividir la computación y los datos, el paralelismo de memoria distribuida permite un uso más eficiente de la memoria y la capacidad de procesamiento de las computadoras. Esto se traduce en una ejecución más rápida de las simulaciones, incluso para problemas de gran complejidad y dimensión.

Sin embargo, la programación de aplicaciones paralelas de memoria distribuida puede ser un desafío. Los programadores deben lidiar con la comunicación entre las computadoras, la

sincronización de las tareas y la gestión de la memoria. Para abordar este problema, existe MPI (Message Passing Interface) que es una biblioteca estándar que facilita la programación de aplicaciones paralelas de memoria distribuida. MPI ofrece funciones para la comunicación y sincronización entre las computadoras, lo que permite enfocarse en el desarrollo de la simulación numérica sin preocuparse por los detalles de la implementación paralela.

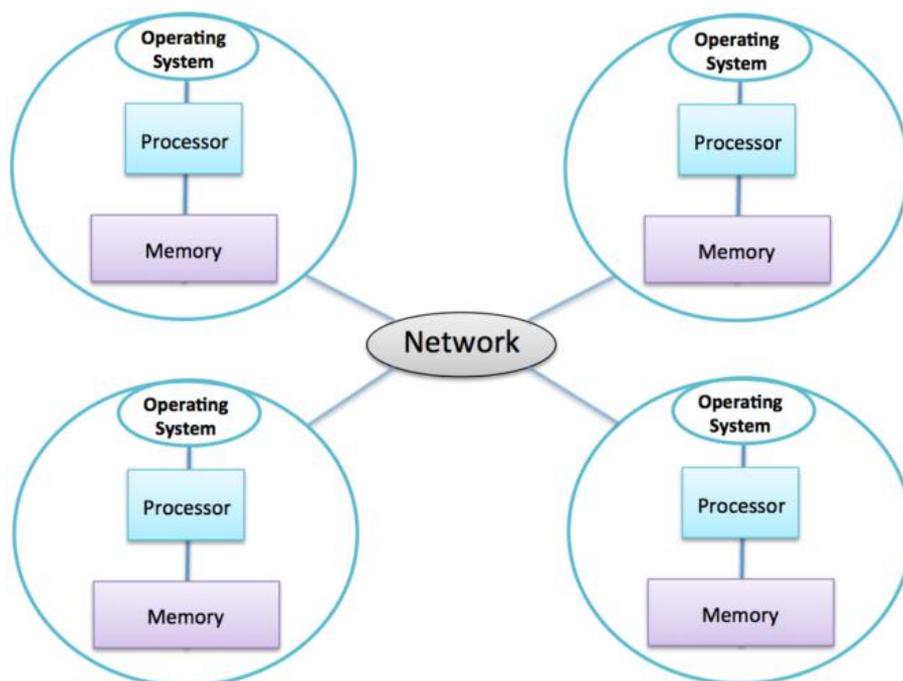


Figura 25 Esquema de un sistema conformado por computadoras de memoria distribuida.  
Fuente: [futurelearn.com](http://futurelearn.com)

#### 3.3.4. Computación acelerada por GPU

Las GPUs surgieron originalmente como componentes especializados para procesar gráficos en computadoras personales. La necesidad de renderizar imágenes en tiempo real, como en los videojuegos y aplicaciones de diseño gráfico, impulsó su desarrollo. Hoy en día, estas unidades se han convertido en herramientas fundamentales para la computación acelerada de simulaciones numéricas complejas, abriendo nuevas posibilidades en el campo científico.

Su gran potencia de procesamiento, basada en una arquitectura de miles de núcleos que trabajan en paralelo, las convierte en la solución ideal para ejecutar tareas que pueden dividirse en pequeñas partes independientes. Esta capacidad permite realizar cálculos complejos en una fracción del tiempo que tomaría una CPU tradicional, impulsando significativamente la velocidad y eficiencia de las simulaciones. La Figura 26 muestra la comparación del tiempo de cómputo de una simulación numérica a escala urbana en CPUs y GPUs, siendo la computación acelerada por GPUs 10.7 veces más rápido.

CUDA, un lenguaje de programación específico para GPUs, ofrece un alto rendimiento para aprovechar al máximo el potencial de estos dispositivos. Sin embargo, su complejidad puede ser un obstáculo para los programadores sin experiencia en este ámbito, limitando su adopción por parte de la comunidad científica. OpenACC surge como una alternativa más accesible. Esta API estándar facilita la programación en GPUs, permitiendo escribir códigos portables que se ejecutan tanto en CPUs como en GPUs. A través de directivas simples, se

indica qué partes del código se deben ejecutar en la GPU, simplificando el proceso de desarrollo y democratizando el acceso a este poder computacional.

Más allá de su uso original en el mundo del entretenimiento, las GPUs se han convertido en una herramienta esencial para el progreso científico, permitiendo a los investigadores explorar nuevos horizontes en la comprensión de fenómenos físicos y el desarrollo de soluciones innovadoras para los desafíos del mundo actual.

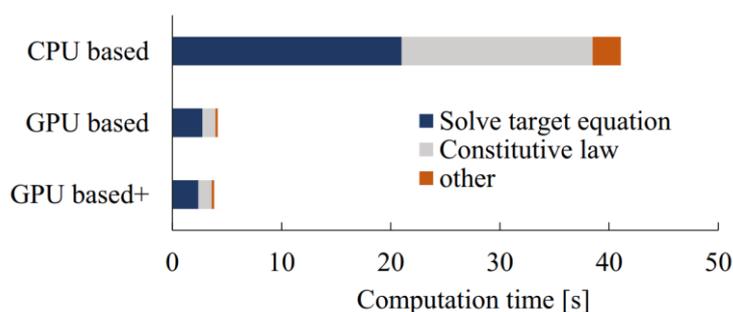


Figura 26 Comparación de tiempo de cómputo utilizando computación en CPUs y GPUs.  
 Fuente: Kusakabe et al., (2021)

### 3.4. Requerimiento de software

Para realizar la simulación numérica mediante el método de elementos finitos se sigue una serie de pasos que parten desde el pre-procesamiento (generación de malla), continuando con el procesamiento (análisis) y concluyendo con el post-procesamiento (visualización de resultados). En cada una de estas etapas es necesario utilizar herramientas destinadas a cumplir tareas específicas.

En esta sección se describen varios softwares para la solución de problemas mediante el método de elementos finitos. Es importante identificar en qué etapas del procedimiento del método puede ser empleada cada herramienta. En ese sentido la Tabla 6 muestra un resumen del alcance de los softwares en mención y el monto que se debe invertir anualmente para adquirir las licencias respectivas.

Tabla 6 Resumen del alcance de cada software. Fuente: Elaboración propia.

Software	Etapas del método de elementos finitos			Costo Anual (\$)
	Pre-Procesamiento	Procesamiento	Post-Procesamiento	
Gmsh	Sí	No	Sí	Software libre
gQuake	No	Sí	No	Software libre*
ParaView	No	No	Sí	Software libre
Plaxis 3D Ultimate	Sí	Sí	Sí	16,961.00
Abaqus	Sí	Sí	Sí	19,000.00
SPEED	No	Sí	No	Software libre

\* Software libre cuyo uso se solicita al propietario.

A continuación, se detallarán algunas de las herramientas disponibles en el mercado para llevar a cabo la creación, análisis y visualización de resultados por el método de elementos finitos.

#### 3.4.1. Gmsh

Gmsh es un generador de mallas de elementos finitos tridimensionales de código abierto. Provee herramientas de mallado que son rápidas, ligeras y amigables. Una ventaja interesante de Gmsh es que la geometría creada a través de su interfaz gráfica se puede editar e importar mediante lenguajes de programación como Python, Fortran, C, entre otros (Geuzaine & Remacle, 2009). En la Figura 27 se puede observar el mallado generado en Gmsh para una estructura compleja como es el caso de un túnel, la malla mostrada consta de 188,145 elementos tetraédricos.

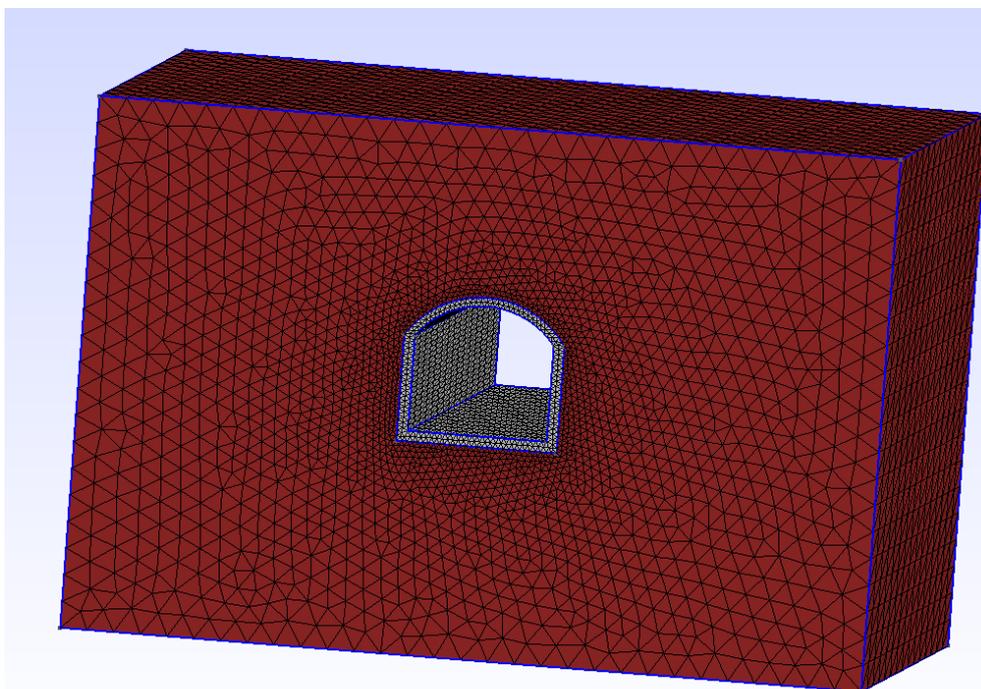


Figura 27 Ejemplo de malla de elementos finitos generado en Gmsh. Fuente: Elaboración propia

El programa Gmsh permite la exportación de la malla generada en diversos formatos de archivos, en particular, se puede seleccionar el formato MESH para dicha exportación. Los archivos con extensión MESH pueden ser analizados por softwares de análisis de elementos finitos como gQuake.

#### 3.4.2. gQuake

gQuake es un software diseñado por el autor del presente documento, cuyo objetivo es realizar simulaciones numéricas de modelos realísticos 3D usando computación de alto rendimiento en CPUs y GPUs. Este software permite realizar simulaciones a gran escala mediante un eficiente manejo de datos y programación en paralelo, tanto en CPUs como en GPUs. gQuake puede ser compilado en sistemas operativos como Windows y Linux. Los tipos de análisis que se pueden realizar con gQuake son: análisis estáticos y análisis dinámicos.

Con el objetivo de validar los resultados que se obtienen con gQuake, en la investigación de Palacios et al. (2024) se realizó una comparación entre los resultados del análisis numérico obtenidos con el software y las soluciones analíticas de un problema de propagación de ondas. En la Figura 28 se muestra la geometría del modelo analizado, donde la fuente de las vibraciones se ubica en el punto O y se consideró al punto C como punto de control. Se realizó el análisis, y se compararon los resultados numéricos y analíticos obtenidos en términos de desplazamientos verticales y horizontales, los errores relativos máximos de la simulación numérica se muestran en la Figura 29. Finalmente, en el punto de control, se puede observar que el error es menor que 4%, dando por validado los resultados obtenidos con gQuake.

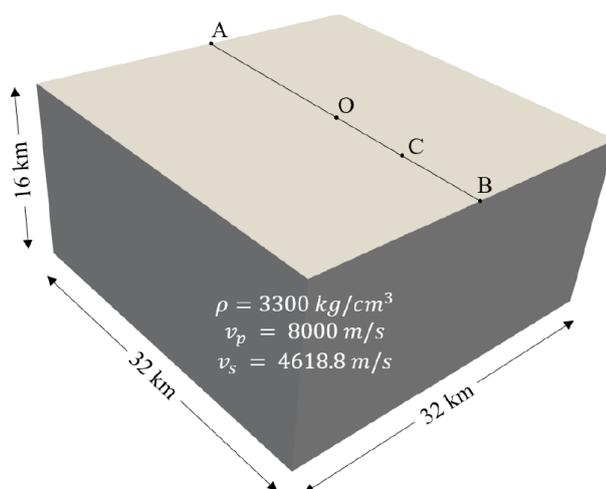


Figura 28 Geometría del modelo 3D para la simulación de la propagación de ondas. Fuente: Palacios et al. (2024)

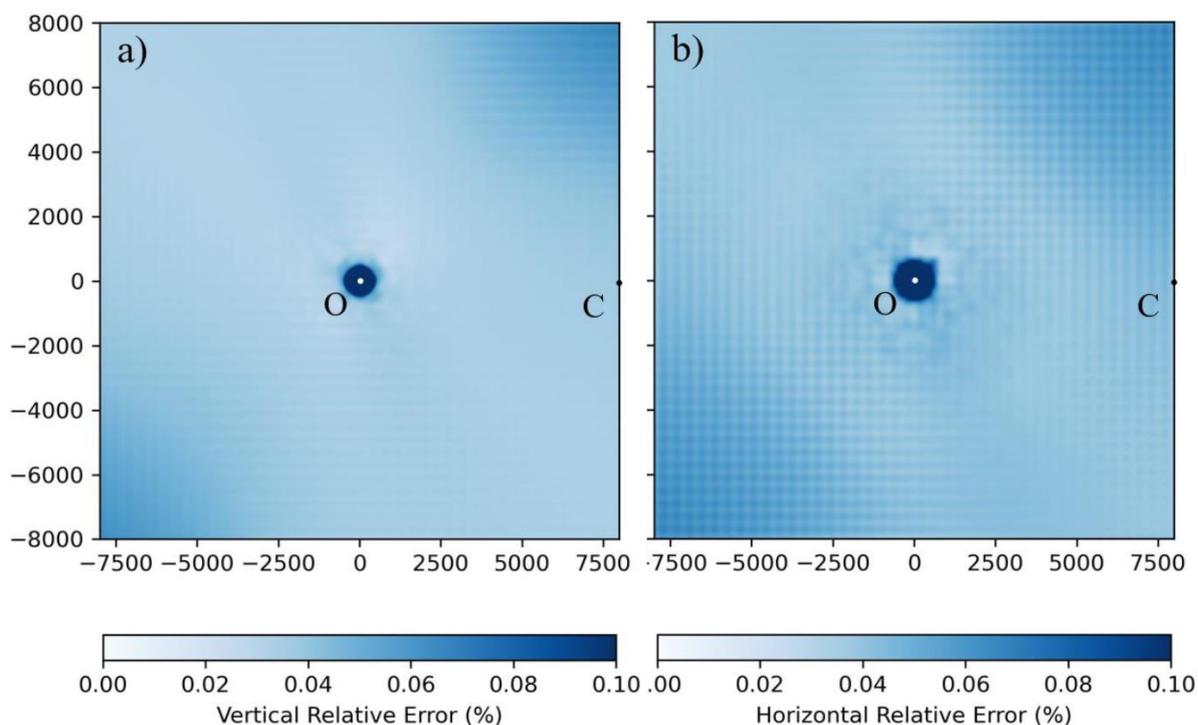


Figura 29 Errores verticales y horizontales relativos máximos de la simulación numérica de propagación de ondas realizada en gQuake. Fuente: Palacios et al. (2024)

Luego de confirmar que los resultados obtenidos de gQuake han sido validados, a continuación, se muestra una aplicación realizada con el software a un modelo 3D de un pavimento ante cargas de un vehículo (ver Figura 30.a). Los resultados del análisis se muestran en la Figura 30.b, donde se pueden observar los esfuerzos producidos en el pavimento por la presencia del vehículo.

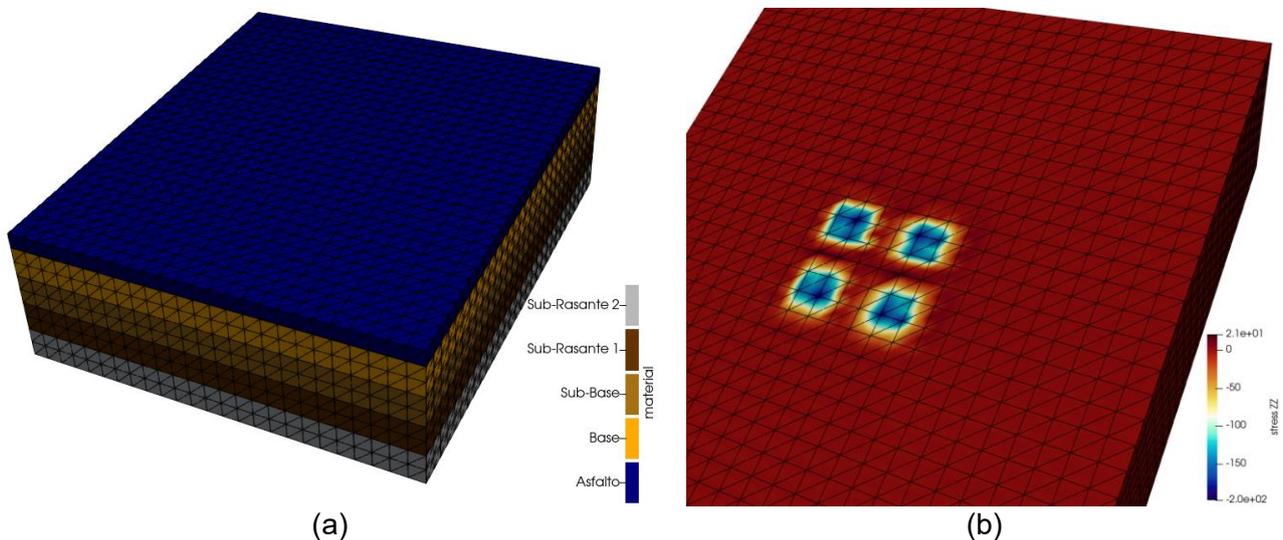


Figura 30 Análisis 3D de pavimento ante cargas de un vehículo: (a) Mallado 3D del pavimento y (b) Esfuerzos producidos en el pavimento. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se mencionan otras aplicaciones que se pueden realizar con gQuake:

- Análisis estático:
  - a) Análisis de estabilidad de talud
  - b) Análisis ante fuerzas sísmicas, de tsunami, de viento y por temperatura
- Análisis dinámico:
  - a) Análisis sísmico de una estructura
  - b) Análisis sísmico de un área urbana
  - c) Análisis de vibraciones por máquinas
  - d) Análisis de impacto o explosión
  - e) Análisis ante fuerzas sísmicas, de tsunami, de viento y por temperatura

Luego de realizar los análisis respectivos, los resultados obtenidos con gQuake son exportados en archivos con formato VTK (Visualization Toolkit) que posteriormente pueden analizarse en softwares de visualización como ParaView.

### 3.4.3. ParaView

ParaView es el motor de visualización de post-procesamiento utilizado a nivel mundial. Este programa de código abierto presenta una interfaz gráfica intuitiva y flexible que permite visualizar y analizar de forma interactiva modelos y resultados de análisis tridimensionales (*About ParaView*, s/f). En la Figura 31 se puede observar cómo ParaView permite la visualización de un análisis por gravedad realizado en gQuake de un modelo de una vivienda de albañilería.

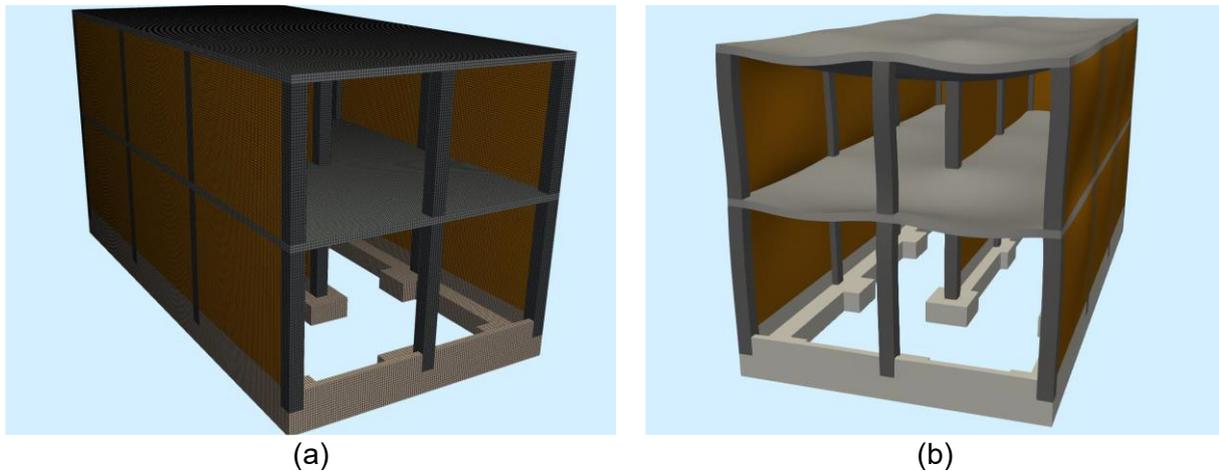


Figura 31 Visualización de resultados de análisis 3D de elementos finitos de vivienda de albañilería: (a) modelo 3D de la vivienda, (b) visualización de la vivienda deformada ante cargas de gravedad. Fuente: Elaboración propia

#### 3.4.4. Plaxis 3D Ultimate

El software Plaxis 3D en su versión *Ultimate* permite el análisis de suelos, rocas y estructuras involucradas. Este programa permite realizar el modelamiento 3D de una manera sencilla gracias a sus herramientas de dibujo o de forma automatizada con comandos en Python. Además, permite generar mallas regulares o irregulares de forma automática o personalizada. Entre otras características a destacar, es la variedad de modelos constitutivos con los que cuenta para la solución de problemas no lineales dinámicos por vibraciones en el suelo producidas por sismos u otras fuentes. Para el post-procesamiento presenta muchas opciones para mostrar las fuerzas, desplazamientos, esfuerzos, velocidades y aceleraciones (PLAXIS 3D, 2022). En la Figura 32 se muestra un modelo 3D generado con Plaxis 3D Ultimate.

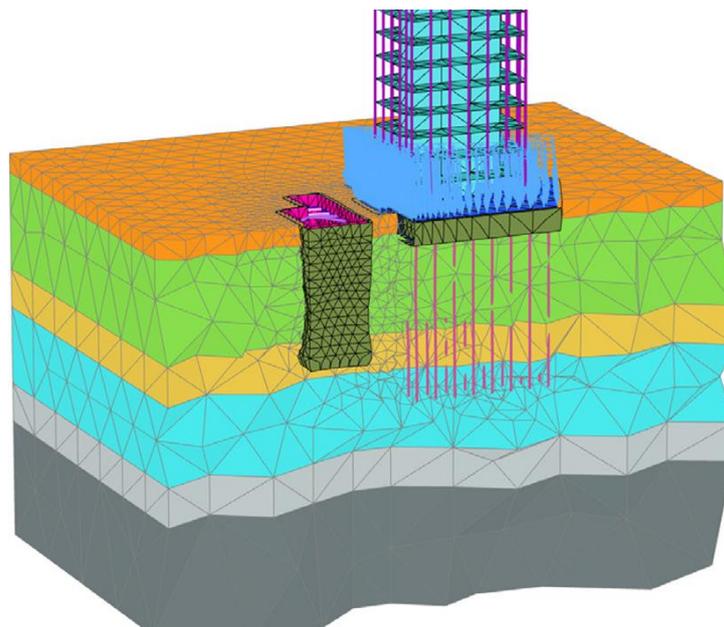


Figura 32 Modelo 3D de elementos finitos generado y analizado con Plaxis 3D Ultimate. Fuente: PLAXIS 3D (2022)

### 3.4.5. Abaqus

Abaqus es un software robusto de análisis de elementos finitos en el cual se pueden simular problemas complejos de la realidad. Dentro del programa se puede encontrar una extensa librería con modelos para diferentes materiales, los cuales pueden ser simulados para obtener esfuerzos y deformaciones. Entre estos materiales, se puede resaltar que Abaqus puede simular concreto reforzado, suelos y rocas (Abaqus, 2023).

También se puede resaltar que es posible realizar análisis bajo cualquier secuencia de cargas estáticas y dinámicas, además, de análisis no lineales. Finalmente, se puede indicar que Abaqus permite el análisis de problemas de gran escala de forma eficiente, debido a que utiliza las arquitecturas de computación de alto rendimiento para aprovechar los recursos computacionales (Abaqus, 2023).

### 3.4.6. SPEED

SPEED (*SP*ectral *E*lements in *E*lastodynamics with *D*iscontinuous *G*alerkin) es un software de código libre que tiene como objetivo principal realizar simulaciones tridimensionales de eventos sísmicos en medios complejos, lo cual involucra el análisis de propagación de ondas sísmicas. Dentro de sus características principales, este programa emplea técnicas de computación de alto rendimiento como el particionamiento de los modelos que analiza con la herramienta METIS. Además, emplea las funciones de la librería MPI para la ejecución de procesos en paralelo (Mazzieri et al., 2013).

En la Figura 33 se puede observar un ejemplo de tres instantes de tiempo de un análisis dinámico no lineal realizado con SPEED. En la figura en mención, se puede observar la complejidad de la geometría analizada que corresponde a un viaducto.

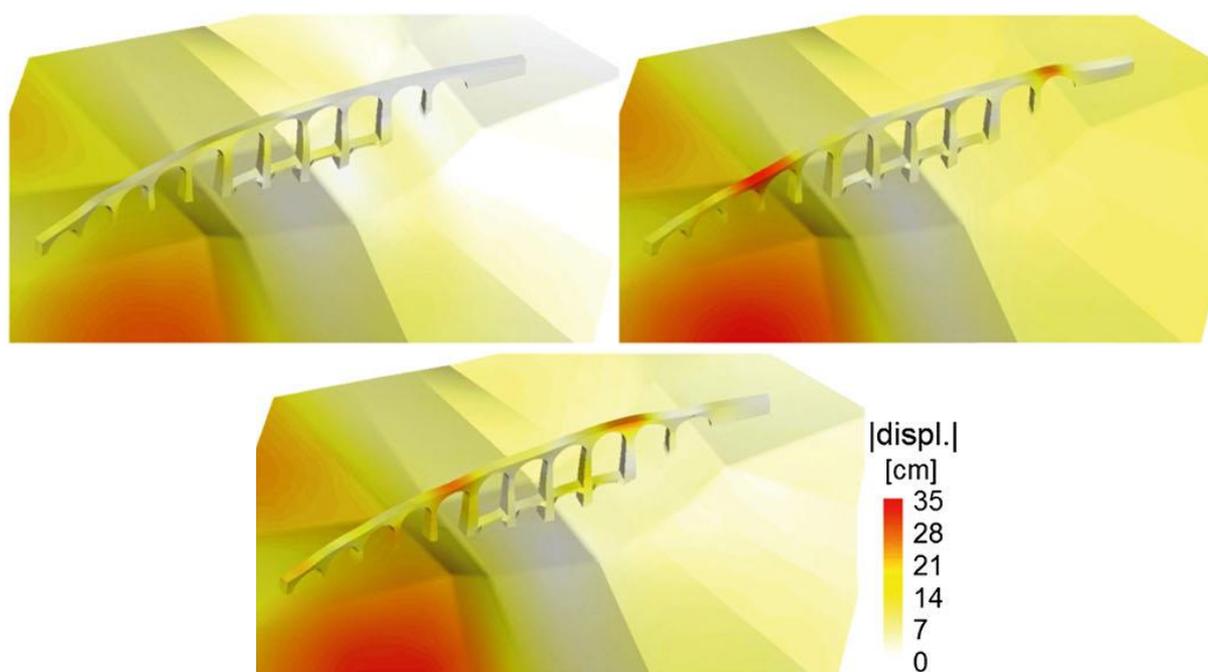


Figura 33 Modelo analizado con SPEED. Fuente: Mazzieri et al. (2013)

### 3.5. Requerimiento de hardware

El requerimiento de software está relacionado al tipo de simulación y tamaño del modelo numérico. Por ejemplo, para el análisis dinámico utilizando el método de elementos finitos es necesario contar con buenos procesadores y una cantidad considerable de memoria RAM disponible para almacenar variables como vectores y matrices de gran longitud.

Basados en Kusakabe et al., (2019) podemos estimar la memoria requerida para realizar un análisis dinámico no lineal de diferentes modelos (ver Tabla 7). Cabe resaltar que esta información es conservadora pues Kusakabe et al., (2019) consideraron más variables relacionadas a los efectos de licuación del suelo.

Tabla 7 Especificaciones de hardware requerido para el análisis de diferentes modelos.

DOF	Memoria RAM requerida (GB)	Computadora sugerida	Especificaciones
$7 \times 10^6$	128	c7i.16xlarge	CPU Intel Xeon Scalable <b>4th Gen</b> , <b>64 vCPUs 3.5 GHz</b> . Memoria DDR5 <b>128GB</b> . Advanced Matrix Extensions.
$28 \times 10^6$	512	r7i.16xlarge	CPU Intel Xeon Scalable <b>4th Gen</b> , <b>64 vCPUs 3.2 GHz</b> . Memoria DDR5 <b>512GB</b> . Advanced Matrix Extensions.
$60 \times 10^6$	1,024	hpc6id.32xlarge	CPU Intel Xeon Scalable <b>3rd Gen</b> , <b>64 vCPUs 3.2 GHz</b> . Memoria DDR5 <b>1,024GB</b> . Advanced Vector Extensions (AVX-512).
$120 \times 10^{6*}$	2,048	x2idn.32xlarge	CPU Intel Xeon Scalable <b>3rd Gen</b> , <b>128 vCPUs 3.5 GHz</b> . Memoria <b>2,048GB</b> . Advanced Vector Extensions (AVX-512).
$240 \times 10^6$	4,096	x2iedn.32xlarge	CPU Intel Xeon Scalable <b>3rd Gen</b> , <b>128 vCPUs 3.5 GHz</b> . Memoria <b>4,096GB</b> . Advanced Vector Extensions (AVX-512).
$1,000 \times 10^{6**}$	17,066	Supercomputadora <sup>†</sup>	Las especificaciones dependerán de cada supercomputadora.

\* Esta cantidad de  $120 \times 10^6$  DOF está en el mismo orden que la cantidad de DOF de un modelo de  $702 \times 702 \times 243 \text{ m}^3$  (Kusakabe et al., 2019).

\*\* Esta cantidad de  $1,000 \times 10^6$  DOF está en el mismo orden que la cantidad de DOF de un modelo de  $1250 \times 1250 \text{ m}^2$  (Hori et al., 2018).

† En este caso se recomienda aplicar para el uso de supercomputadoras.

En el caso de que se requiera realizar el análisis de un modelo de mayores dimensiones como lo realizado para la ciudad de Tokio (Hori et al., 2018) o lo realizado para la región de Kanto, Japón (Ichimura et al., 2022), es necesario contar con mayor poder computacional y optar por otras alternativas para la computación. En este contexto, las supercomputadoras cuentan con más capacidad para este tipo de computación.

La Tabla 8 muestra las 10 mejores supercomputadoras a la fecha de noviembre de 2023. Como se puede observar de la tabla, seis de las mejores supercomputadoras pertenecen a entidades de Estados Unidos, tres de países de Europa y una de Japón. Además, la mayoría de estas supercomputadoras pertenece a Centros o Laboratorios nacionales para

computación de alto rendimiento de aplicaciones de interés nacional. Esto resalta la necesidad de contar con un laboratorio nacional de computación de alto rendimiento en nuestro país. Es relevante mencionar que algunas de las instituciones que operan estas supercomputadoras ofrecen acceso a colaboradores externos a sus países para el desarrollo de proyectos colaborativos.

Tabla 8 Descripción de las mejores 10 supercomputadoras. Fuente: <https://top500.org>

Supercomputadora	Entidad	Cores	Rmax (PFlop/s*)	Potencia (kW)
<b>Frontier:</b> HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz.	Oak Ridge National Laboratory, Estados Unidos	8,699,904	1,194.00	22,703
<b>Aurora:</b> HPE Cray EX - Intel Exascale Compute Blade, Xeon CPU Max 9470 52C 2.4GHz, Intel Data Center GPU	Argonne National Laboratory, Estados Unidos	4,742,808	585.34	24,687
<b>Eagle:</b> Microsoft NDv5, Xeon Platinum 8480C 48C 2GHz, NVIDIA H100	Microsoft Azure, Estados Unidos	1,123,200	561.20	--
<b>Fugaku:</b> A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu	RIKEN Center for Computational Science, Japón	7,630,848	442.01	29,899
<b>LUMI:</b> HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz.	Euro HPC/CSC, Finlandia	2,752,704	379.70	7,107
<b>Leonardo:</b> BullSequana XH2000, Xeon Platinum 8358 32C 2.6GHz, NVIDIA A100 SXM4 64 GB	EuroHPC CINECA, Italia	1,824,768	238.70	7,404
<b>Summit:</b> IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100	Oak Ridge National Laboratory, Estados Unidos	2,414,592	148.60	10,096
<b>MareNostrum 5 ACC:</b> BullSequana XH3000, Xeon Platinum 8460Y+ 40C 2.3GHz, NVIDIA H100 64GB	EuroHPC BSC, España	680,960	138.20	2,560
<b>DGX SuperPOD:</b> NVIDIA DGX H100, Xeon Platinum 8480C 56C 3.8GHz	NVIDIA Corporation, Estados Unidos	485,888	121.40	--
<b>Sierra:</b> IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100	Lawrence Livermore National Laboratory, Estados Unidos	1,572,480	94.64	7,438

\* PFlop/s indica el poder computacional medido en  $10^{15}$  operaciones de punto flotante por segundo.

Asimismo, de la Tabla 8 podemos inferir que la mayoría de las computadoras utilizan tanto CPUs como GPUs, incluyendo dispositivos de NVIDIA y AMD, lo que indica que son sistemas heterogéneos. Esta tendencia también se ve reflejada en las computadoras personales, lo cual implica que los softwares deben de sacar provecho también al poder computacional que proporcionan las GPUs.

### 3.6. Costo monetario de computación

Antes de calcular el costo monetario de la computación, es crucial evaluar si es más conveniente adquirir una computadora de alto rendimiento o alquilarla por un período específico. En el caso de comprar una computadora, se debe considerar la depreciación debido a la evolución de la tecnología a lo largo de los años. Esto ocurre cuando los componentes de hardware de una computadora se vuelven menos eficientes ante las demandas de computación más recientes.

La Figura 34 muestra la evolución real y proyectada de la tecnológica de las supercomputadoras desde el año 1990 al 2028. De esta figura, se puede decir que cada cinco años el poder computacional se multiplica por diez. Es otras palabras, en 5 años una computadora se depreciará considerablemente. En ese sentido, en el presente estudio se recomienda optar por rentar computadoras de alto rendimiento ya sea en servicios de computación en la nube o en los servicios de computación proporcionados por las entidades que poseen supercomputadoras.

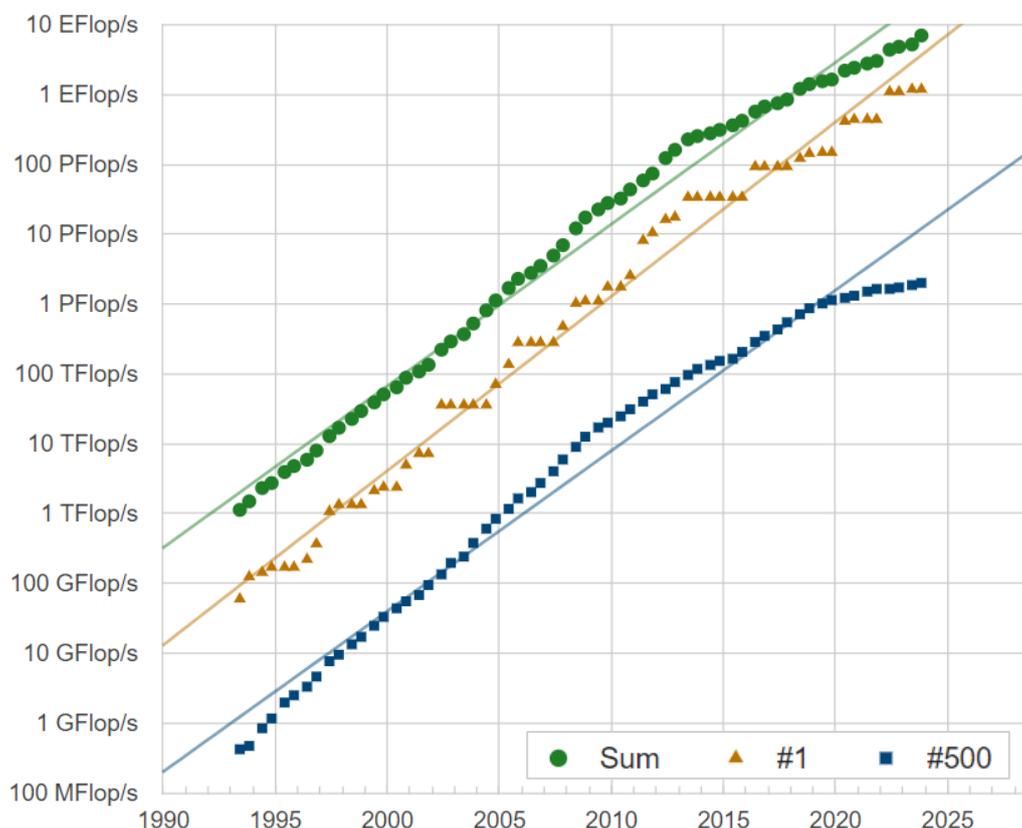


Figura 34 Evolución del poder computacional en el tiempo. Fuente: <https://top500.org>

Teniendo en cuenta la evolución del poder computacional y la depreciación asociada con la adquisición de computadoras potentes, en las siguientes líneas nos enfocaremos en los servicios de computación en la nube. Para ello, se realizó una búsqueda de las empresas que brindan este servicio, destacando entre ellas Microsoft Azure, Google Cloud Platform y Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2). Según Wankhede et al., (2020), Amazon EC2 es el más antiguo de los tres y proporciona más opciones de computación. En ese sentido, tomaremos como referencia los precios estimados para la computación de Amazon

EC2. La Tabla 9 muestra los precios estimados de las computadoras sugeridas para el análisis de diferentes modelos de elementos finitos mencionados en la Tabla 7.

Tabla 9 Costo por hora de diferentes computadoras en dólares, obtenidos del sitio oficial de AWS (<https://calculator.aws>) actualizado al mes de abril de 2024.

Computadora sugerida de AWS	Memoria RAM (GB)	#CPUs	Costo por Hora (\$)
c7i.16xlarge	128	64	2.86
r7i.16xlarge	512	64	4.23
hpc6id.32xlarge	1,024	64	5.70
x2idn.32xlarge	2,048	128	13.3
x2iedn.32xlarge	4,096	128	26.7

Aunque la computación acelerada es una opción más atractiva en la actualidad y podría reducir el tiempo de procesamiento, los precios de renta de computadoras implementadas con GPUs son más elevados debido a los requerimientos especiales de energía y refrigeración. Además, a la actualidad la memoria dedicada de las GPUs es menor comparada con la memoria RAM que suele utilizar las CPUs, lo cual sería una limitante para las simulaciones de modelos de gran dimensión.

En ese sentido, realizaremos una estimación del costo para una simulación considerando la computadora para computación de alto rendimiento basada en CPUs, *hpc6id.32xlarge*. Teniendo en cuenta la investigación realizada por Kusakabe et al., (2021), estimamos que la computadora *hpc6id.32xlarge* nos permitiría realizar simulaciones de modelos de  $60 \times 10^6$  DOF (modelo de dimensiones de  $\sim 600 \times 600 \times 240$  m<sup>3</sup>). El tiempo que demoraría en realizar una simulación de un evento sísmico de 2 minutos sería de aproximadamente dos días. Además del tiempo de simulación, es necesario tener en cuenta el tiempo requerido para instalar el software de elementos finitos, realizar pruebas y visualizar los resultados. En total, este proceso podría llevar alrededor de siete días. En ese sentido el costo monetario de computación estaría dado por:

$$\text{Costo}(\$) = \frac{\$5.70}{\text{hora}} \times 24 \text{ horas} \times 7 \text{ días} = \$ 957.60$$

Este costo resulta ser conveniente para la simulación numérica tridimensional de propagación de ondas sísmicas a escala urbana comparado con el costo de adquirir servidores para la computación de alto rendimiento pues este tipo de equipamiento se depreciaría considerablemente en los próximos 5 años.

Para evaluar la viabilidad de la computación en la nube frente a la adquisición de un servidor propio, se consultaron las plataformas web de Dell EMC, Hewlett Packard Enterprise (HPE) y Lenovo. Se estimó que un [servidor equivalente](#) a *hpc6id.32xlarge* costaría alrededor de \$60,000. Las especificaciones y costo de adquisición del servidor se encuentran en la página de Dell (<https://dell.com>). A este costo inicial, se debe sumar el costo operativo y el mantenimiento anual, estimado en un 30% del costo del servidor. Si asumimos que realizaremos simulaciones numéricas a gran escala en 5 proyectos a lo largo de 5 años, el costo de computación en la nube sería alrededor de \$5,000, mientras que el costo utilizando un servidor adquirido sería de \$150,000.

En resumen, la computación en la nube ofrece una solución económica y escalable para realizar simulaciones numéricas a gran escala, en comparación con la adquisición y el mantenimiento de un servidor propio.

#### 4. REQUERIMIENTO DE INFORMACIÓN PARA EL MODELO 3D

Para realizar una simulación numérica 3D precisa, es necesario contar con información detallada sobre el modelo de estudio. Esta información abarca aspectos como la topografía del terreno, las propiedades geotécnicas del subsuelo y la distribución de las estructuras en la superficie. La recopilación y sistematización de esta información constituyen un paso crucial en la generación del modelo 3D, y su calidad determinará en gran medida la confiabilidad de los resultados de la simulación.

En este capítulo, se abordarán los requerimientos de información específicos para cada uno de los componentes del modelo 3D: modelo digital de elevación, modelo de velocidades sísmicas, caracterización geotécnica e inventario de estructuras. Se describirán las diferentes fuentes de datos disponibles para cada componente. Adicionalmente, en esta sección se muestra plataformas web donde están disponibles información de la observación sísmica en el Perú.

A modo de ejemplo, la Figura 35 presenta un modelo 3D de la ciudad cerca a la estación de Tokio y el área circundante (1,024 m × 1,024 m × 370 m) con estructuras subterráneas y de edificios, así como las capas que describen los estratos del suelo.

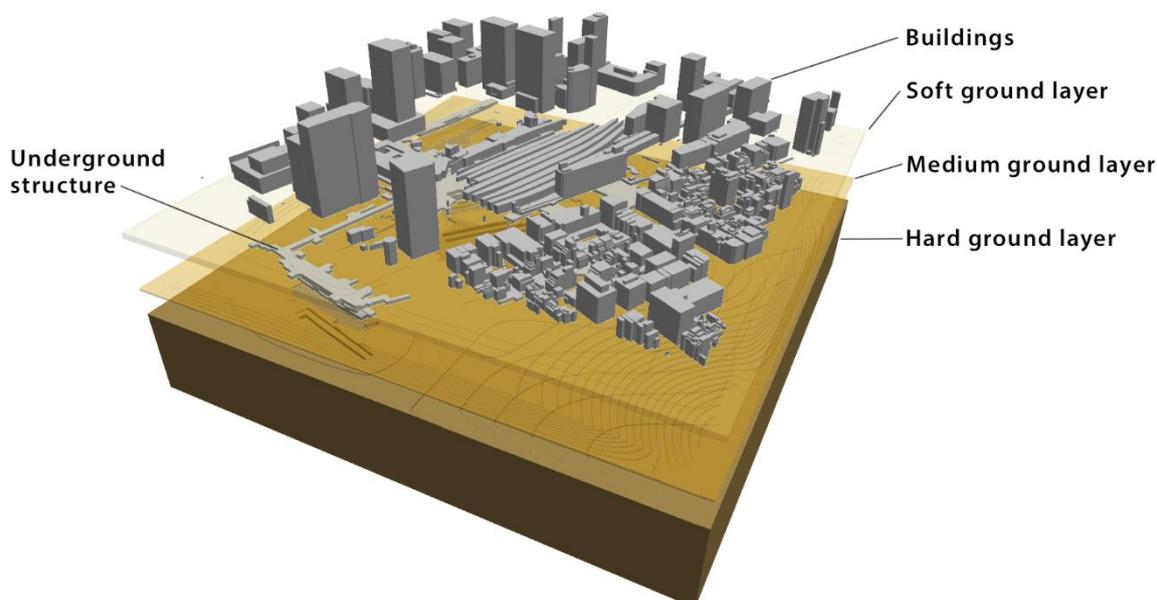


Figura 35 Modelo de la ciudad cerca a la estación de Tokio con estructuras subterráneas, edificios y la información de las propiedades del suelo mediante capas. Fuente: Universidad de Tokio.

##### 4.1. Modelo digital de elevación

El Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) es una representación numérica de la superficie terrestre en forma de matriz cuyos coeficientes representan la altura del terreno en cada punto. Los DEMs son herramientas esenciales para la simulación de la propagación de ondas sísmicas a escala urbana, ya que permiten representar la geometría compleja de la superficie y de las estructuras.

La información contenida en un DEM se puede utilizar para generar mallas de elementos finitos que se ajusten a la forma real del terreno. El modelo de elementos finitos es necesario para realizar simulaciones numéricas de la propagación de ondas sísmicas. Además, al utilizar los DEMs se puede identificar áreas de riesgo sísmico en función de la pendiente del terreno. La calidad del DEM es un factor importante que influye en la precisión de los resultados de la simulación. Un DEM de alta resolución tendrá una mayor precisión que un DEM de baja resolución. Sin embargo, un DEM de alta resolución también requerirá más recursos computacionales para ser procesado. En la práctica, los DEMs se suelen generar a partir de datos de fotogrametría aérea. Hoy en día, los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS), también conocidos como drones, han revolucionado la fotogrametría aérea al proporcionar una solución aérea versátil y accesible para la captura de datos.

Estos datos también se pueden obtener a partir de diferentes fuentes, como agencias gubernamentales o empresas privadas. Una plataforma web geoespacial de libre acceso que muestra los DEM de estas entidades es SIGRID (Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres). Esta plataforma está diseñada para consultar, compartir, analizar y monitorear la información relacionada a los peligros, vulnerabilidades y riesgos originados por sucesos de la naturaleza. También contiene información territorial del país facilitada por entidades técnico-científicas y entidades públicas del país relacionadas a la gestión de riesgos.



Figura 36 Áreas donde se tiene información de DEMs en Lima Metropolitana (color rojo).

Fuente: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/drones?c=lima>

Considerando los estudios descritos en los capítulos anteriores y la disponibilidad de datos, para el modelo numérico tridimensional a escala urbana es recomendable contar con modelos DEM de resolución de 5 cm como mínimo.

#### 4.2. Modelo 3D de velocidades sísmicas

El modelo de velocidades sísmicas proporciona información sobre la distribución espacial de las propiedades del suelo, lo que es esencial para simular con precisión la propagación de las ondas sísmicas en este medio. Para la determinación de velocidades sísmicas en el subsuelo, los ensayos geofísicos MAM (Microtremor Array Measurement) y MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves) son dos métodos geofísicos ampliamente utilizados. Estos métodos se basan en el análisis de la dispersión de ondas superficiales, las cuales son sensibles a las propiedades del suelo a diferentes profundidades.

Los métodos MAM y MASW se pueden utilizar para obtener perfiles unidimensionales de velocidades sísmicas en el subsuelo. Estos perfiles se pueden interpolar y extrapolar para construir un modelo 3D de velocidades sísmicas que represente la zona de estudio. Actualmente, existen diferentes software y técnicas disponibles para realizar esta interpolación y extrapolación. Una opción popular es utilizar el software OpendTect, un software que permite construir modelos 3D del subsuelo a partir de perfiles unidimensionales.

Una plataforma web geoespacial de libre acceso que muestra los resultados de los ensayos geofísicos mencionados y los perfiles unidimensionales es la Plataforma Virtual de Visualización de Perfiles de Suelo de SENCICO (ver Figura 37).

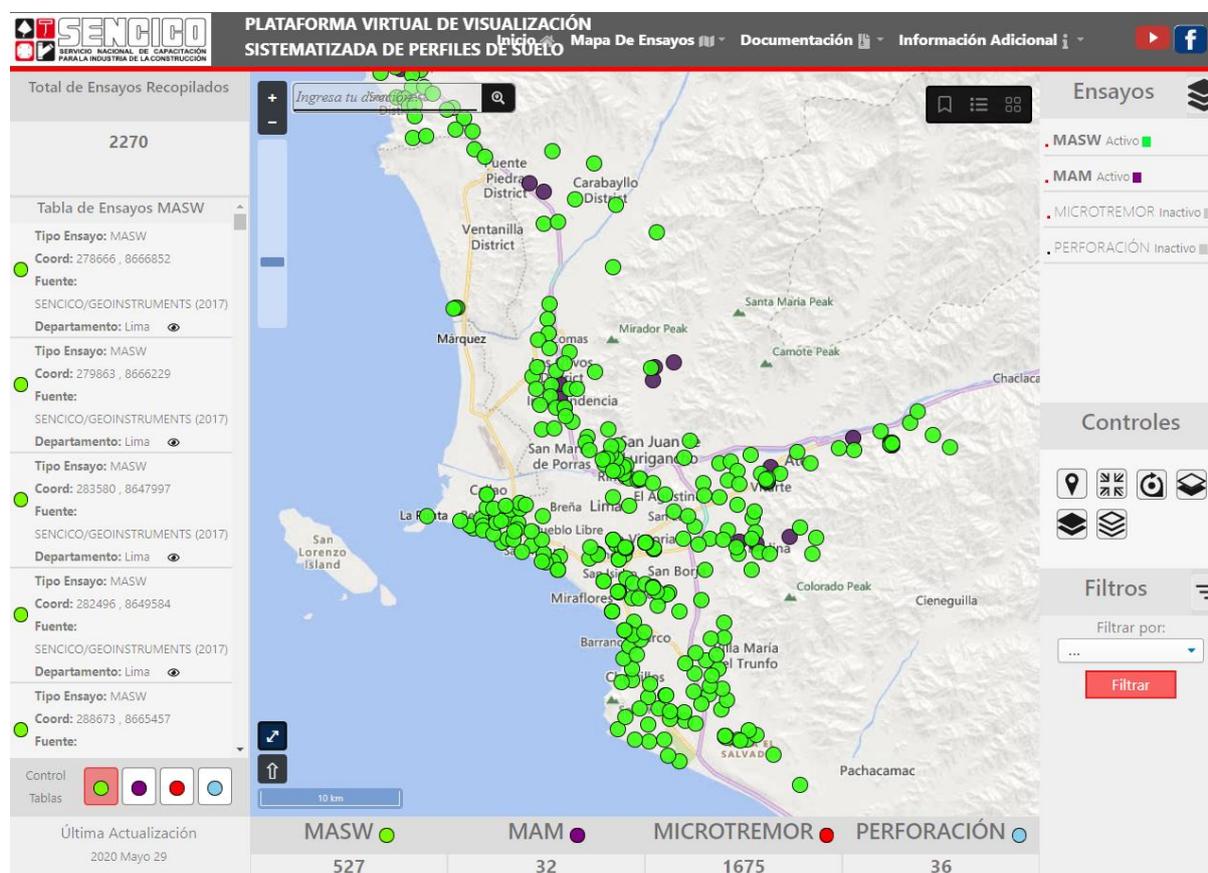


Figura 37 Puntos donde se tiene información de los ensayos geofísicos en Lima Metropolitana. Fuente: <https://perfilesuelos.sencico.gob.pe/CatalogoWeb>

En un estudio realizado por Panzera et al. (2022) se emplearon 200 ensayos geofísicos para la reconstrucción de un modelo 3D de una cuenca. En dicha investigación, el área de estudio tenía una extensión de  $18 \text{ km}^2$ . Con dicha información, se puede estimar la cantidad de ensayos geofísicos por  $\text{km}^2$  recomendable para la creación de un modelo numérico tridimensional.

$$\text{Densidad de ensayos geofísicos} = \frac{200 \text{ ensayos}}{18 \text{ km}^2}$$

$$\text{Densidad de ensayos geofísicos} = 11 \frac{\text{ensayos}}{\text{km}^2}$$

Es importante destacar que esta densidad puede variar dependiendo de la complejidad de la zona de estudio.

#### 4.3. Caracterización geotécnica

Por lo general, el suelo no se comporta como un material elástico lineal durante terremotos, sino que exhibe una respuesta no lineal que depende del nivel de esfuerzo aplicado. Esta no linealidad puede tener un impacto significativo en la propagación de las ondas sísmicas, especialmente en áreas con suelos blandos o cohesivos. Existen diversos modelos para describir el comportamiento no lineal del suelo que consideran una serie de parámetros para definir las propiedades mecánicas del suelo. Por lo general, estos parámetros se pueden obtener a partir de ensayos de laboratorio y se describen a continuación:

- Ensayo de corte triaxial drenado: Este ensayo se realiza en una muestra cilíndrica de suelo que se confina axialmente y luego se carga lateralmente hasta la falla. Se mide la tensión axial, la tensión radial y la deformación axial de la muestra durante el ensayo. Los resultados del ensayo se utilizan para determinar la resistencia al corte drenado ( $\phi$ ), el módulo de corte drenado (G) y el parámetro de plasticidad.
- Ensayo de corte triaxial no drenado: Este ensayo es similar al ensayo de corte triaxial drenado, pero no se permite drenar agua durante el ensayo. Los resultados del ensayo se utilizan para determinar la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) y el módulo de corte no drenado ( $G_u$ ).
- Ensayo de compresión uniaxial: Este ensayo se realiza en una muestra cilíndrica de suelo que se carga axialmente hasta la falla. Se mide la tensión y la deformación axial de la muestra durante el ensayo. Los resultados del ensayo se utilizan para determinar el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).
- Ensayo de oedometría: Este ensayo se realiza en una muestra de suelo que se confina lateralmente y se carga verticalmente en incrementos. Se mide la deformación vertical de la muestra durante el ensayo. Los resultados del ensayo se utilizan para determinar el coeficiente de compresibilidad vertical ( $m_v$ ) y el índice de vacío (e).

Uno de los modelos más utilizados para describir el comportamiento no lineal del suelo es el modelo Hardening Soil. Por ejemplo, Falcone et al. (2018) utilizaron este modelo cuyos parámetros se muestran en la Tabla 10.

En el país se han realizado varios ensayos geotécnicos y actualmente existe una plataforma web geoespacial de libre acceso que muestra los resultados de perforaciones geotécnicas, la Plataforma Virtual de Visualización de Perfiles de Suelo de SENCICO (ver Figura 38).

Tabla 10 Parámetros para describir el comportamiento del suelo según el modelo de Hardening Soil. Fuente: Falcone et al. (2018)

Parameters	Name	Unit 1	Unit 2
<i>Shear strength</i>			
$c$ (kPa)	Effective cohesion	1E35	1E35
$\varphi$ (°)	Effective friction angle	89	89
$\psi$ (°)	Dilatancy angle	0	0
<i>Stiffness parameters</i>			
$m$ (-)	Power for the stress-level dependency of stiffness	0	0
$E_{50}^{ref}$ (MPa)	Reference secant stiffness in standard drained triaxial test	21.8	349.5
$E_{oed}^{ref}$ (MPa)	Reference tangent stiffness for primary oedometer loading test	21.8	349.5
$E_{ur}^{ref}$ (MPa)	Reference unloading/reloading stiffness at engineering strains	65.5	1048.5
$\nu_{ur}$ (-)	Poisson's ratio for unloading/reloading	0.25	0.25
$G_0^{ref}$ (MPa)	Reference shear modulus at very small strains	73.4	1174.3
$\gamma_{0.7}$ (-)	Shear strain at which $G_s = 0.722G_0^{ref}$	0.025	0.025

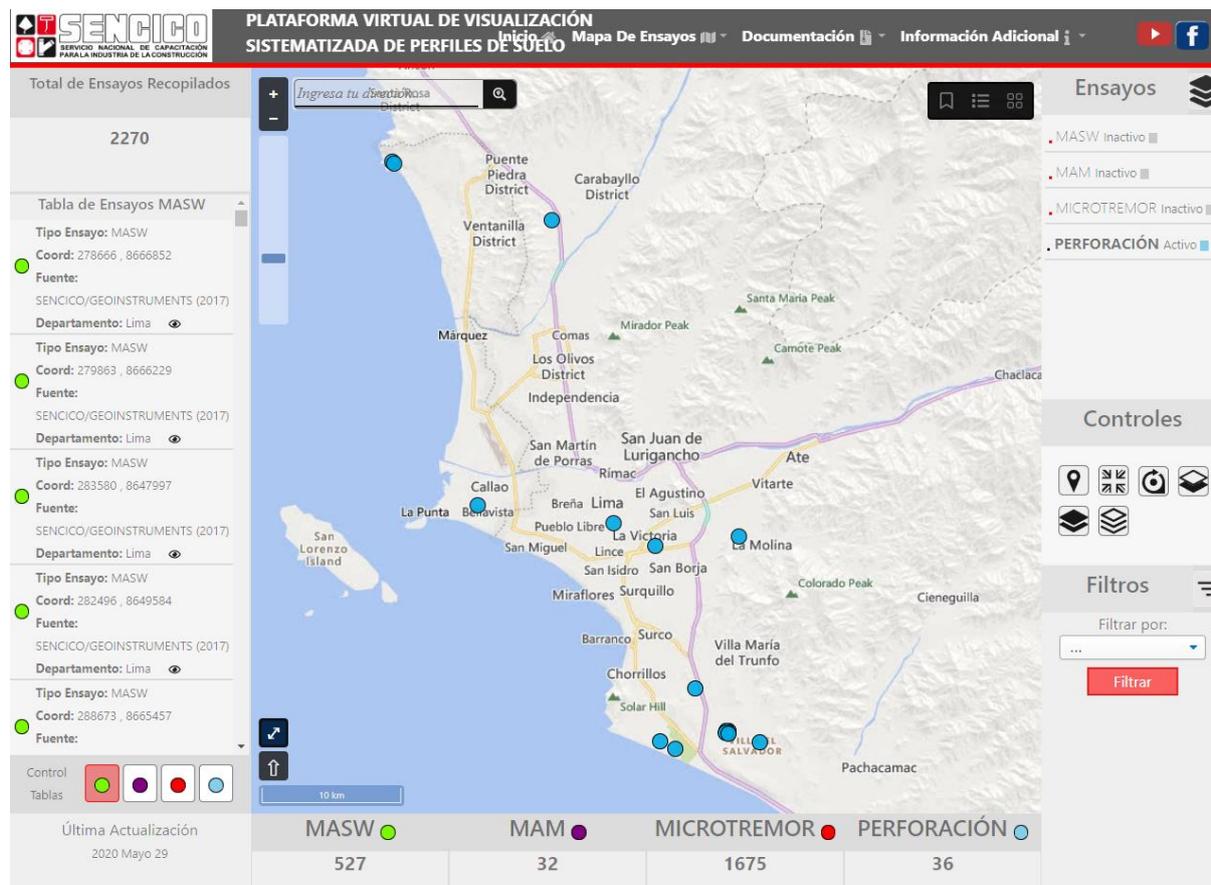


Figura 38 Puntos donde se tiene información de las perforaciones geotécnicas en Lima Metropolitana. Fuente: <https://perfilesuelos.sencico.gob.pe/CatalogoWeb>

Asimismo, en el estudio realizado por Panzera et al. (2022) se emplearon 98 perforaciones geotécnicas para la reconstrucción de un modelo 3D de una cuenca. En esta investigación, el área de estudio tenía una extensión de  $18 \text{ km}^2$ . Con dicha información, se puede calcular la cantidad de ensayos geotécnicos por  $\text{km}^2$  recomendable para la creación de un modelo numérico tridimensional.

$$\text{Densidad de perforaciones geotécnicas} = \frac{98 \text{ perforaciones}}{18 \text{ km}^2}$$

$$\text{Densidad de perforaciones geotécnicas} = 6 \frac{\text{perforaciones}}{\text{km}^2}$$

Es importante destacar que esta densidad puede variar dependiendo de la complejidad de la zona de estudio.

#### 4.4. Inventario de estructuras

Actualmente, utilizando la información en plataformas como Google Street View es posible realizar el inventario de estructuras de manera automática mediante técnicas de inteligencia artificial. Por ejemplo, Ogawa et al., (2023) utilizó las imágenes de Street View para no solo clasificar la información de las estructuras sino que también para estimar el año de construcción de estas. Asimismo, Aravena Pelizari et al., (2021) utilizaron técnicas de aprendizaje automático para caracterizar edificios y realizar la evaluación de su riesgo sísmico.

En las ciudades, las estructuras se pueden dividir en superficiales y subterráneas. Las estructuras superficiales son principalmente edificaciones y estructuras especiales como naves industriales y monumentos. Mientras tanto, las subestructuras abarcan túneles, redes de tuberías de agua, gas, alcantarillado, entre otras.

Según la Norma Técnica E.030 del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, (2018) las edificaciones se pueden clasificar en tres niveles de importancia: esenciales, importantes y comunes. Las edificaciones esenciales incluyen establecimientos de salud, puertos, aeropuertos, estaciones de bomberos, instituciones educativas, instalaciones de electricidad, reservorios y plantas de tratamiento de agua. Las importantes comprenden centros comerciales, cines, teatros, estadios, coliseos y patrimonios valiosos. Por último, las edificaciones comunes son viviendas, oficinas, hoteles y depósitos.

Considerando que el 83% de estructuras en Lima y Callao son viviendas de albañilería (Flores Terreros et al., 2019), es decir edificaciones comunes, estas se podrían evaluar sistemáticamente mediante métodos simplificados como el de varios grados de libertad (MDOF). No obstante, para las estructuras que son esenciales, importantes o estructuras subterráneas (no comunes) es recomendable evaluarlas con métodos más precisos que consideren su geometría, material y parámetros que definen su comportamiento sísmico. En ese sentido, en este estudio clasificaremos a las estructuras en comunes y no comunes para explicar cómo se puede obtener la información y generar un inventario de estructuras.

Para el caso de edificaciones comunes, se recomienda realizar un levantamiento de la información sistematizado a través de trabajos de campo como los trabajos que ha realizado el CISMID en los últimos años o uso de tecnologías de segmentación a partir de imágenes de Google Street View (Ogawa et al., 2023 y Aravena Pelizari et al., 2021). Este levantamiento de información sirve para recopilar parámetros como el número de pisos, material, entre otros los cuales se realizan con juicio de profesionales de ingeniería civil.

En cuanto a las edificaciones no comunes, que pueden presentar geometrías complejas como estructuras subterráneas, tanques de almacenamiento de agua, pilares de puentes, estribos de puentes, entre otros, se recomienda realizar un levantamiento más detallado. Este proceso implicaría recopilar información mediante vuelos de RPAS, llevar a cabo ensayos físicos para extraer propiedades y monitorear su comportamiento estructural para evaluar el estado de estas estructuras.

Luego la información del inventario de estructuras se puede incorporar en el modelo numérico 3D para estimar su respuesta sísmica como se muestra en la sección 6.1.2.

#### 4.5. Observación sísmica

La observación sísmica juega un papel fundamental en la validación y el ajuste de modelos numéricos tridimensionales de propagación de ondas sísmicas a escala urbana. Los datos obtenidos a través de estaciones acelerográficas en el suelo y acelerómetros en las estructuras brindan información crucial sobre el comportamiento real de las ondas sísmicas en un entorno urbano complejo.

Por ejemplo, en la investigación realizada por Ichimura et al. (2014), se llevó a cabo una simulación numérica a escala urbana en la que se analizó la respuesta sísmica de una zona de estudio ante un movimiento sísmico en la roca madre. Este movimiento fue definido por un registro sísmico obtenido de la red de observación sísmica metropolitana de Japón (MeSO-net). Además, la respuesta sísmica de la simulación fue comparada con dos registros sísmicos medidos en la superficie por la red de observación SUPREME obteniendo una buena correlación. En ese sentido es recomendable contar con tres puntos de observación en la zona de estudio para realizar la simulación numérica y su correspondiente validación.

En cuanto a las características técnicas de la instrumentación sísmica de este tipo de observación, es necesario contar con acelerómetros cuyo rango de medición sea de al menos  $\pm 1g$  y frecuencia de muestreo de 100Hz. Asimismo, es recomendable que el sensor sea lo suficientemente sensible de detectar movimientos sísmicos de  $\pm 0.001g$ .

Los registros de las estaciones acelerográficas en el suelo pueden ser utilizados directamente como input en las simulaciones numéricas. Esto permite incorporar información real sobre la excitación sísmica en el modelo, lo que resulta en simulaciones más realistas y confiables. En el Perú existen diversas páginas que proporcionan esta información al público. Entre ellas tenemos al CISMID que proporciona esta información a través de una plataforma web (ver Figura 39). Cabe resaltar que el CISMID es un centro de investigación académica que se centra más en el estudio detallado del comportamiento sísmico en áreas específicas, especialmente en zonas urbanas donde la vulnerabilidad estructural es una preocupación importante.

Por otro lado, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) cuenta con una red de estaciones sísmicas distribuidas a lo largo de todo el territorio peruano. Cabe resaltar que el objetivo principal del IGP es la vigilancia sísmica a nivel nacional, proporcionando información en tiempo real sobre la actividad sísmica en todo el país. El IGP también cuenta con una plataforma web para visualizar y descargar los registros sísmicos (ver Figura 40).

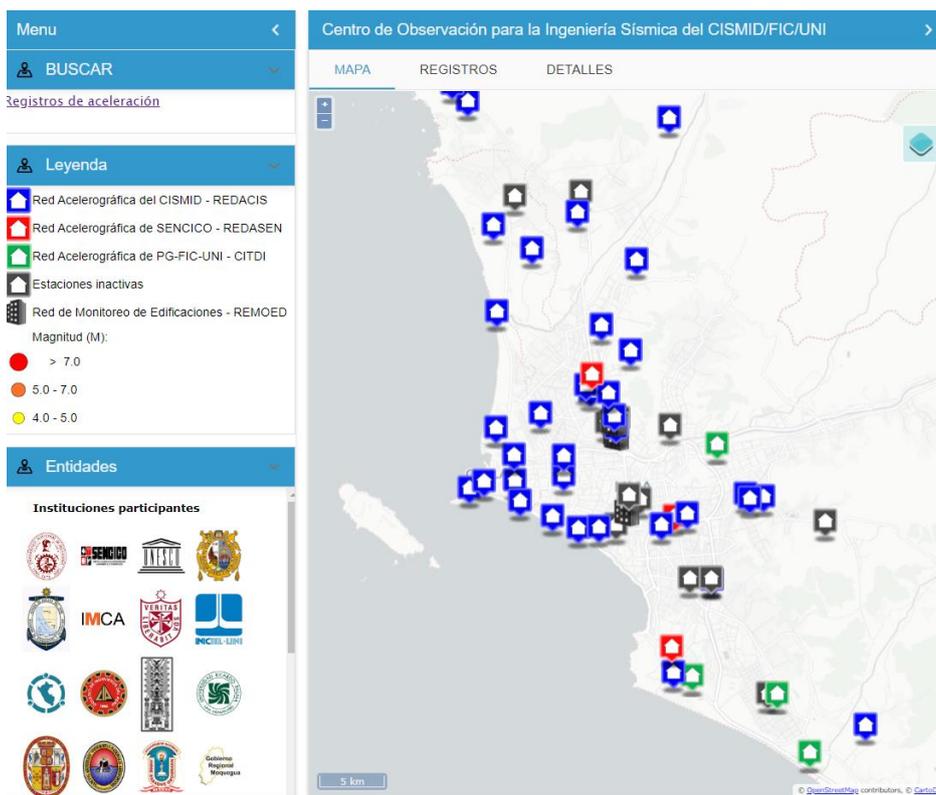


Figura 39 Estaciones acelerográficas activas del CISMID en Lima Metropolitana con información disponible para descargar. Fuente: <https://www.cismid.uni.edu.pe/ceois/red/>



## REPORTES Y REGISTROS ACELEROMÉTRICOS

- Información Acelerométrica
- Red acelerométrica Nacional
- Reportes y registros acelerométricos
- Sismos Históricos

Filtro: 2024

Todos

Mostrar 10 reportes

Listado de reportes y registros acelerométricos (mayor e igual a M.4.5)					
Número de reporte	Fecha y hora	Magnitud	Profundidad	Ubicación	Acciones
IGP/ACELDAT-PERU 2024-0276	01/05/2024, 21:16:09	4.8	18 km.	-13.640, -72.650	 
IGP/ACELDAT-PERU 2024-0251	21/04/2024, 18:22:34	4.6	15 km.	-3.770, -81.680	 
IGP/ACELDAT-PERU 2024-0238	14/04/2024, 23:13:13	4.5	21 km.	-14.500, -76.170	 

Figura 40 Cuatro de las estaciones acelerográficas del IGP en Lima Metropolitana con información disponible para descargar. Fuente: <https://www.igp.gob.pe/servicios/aceldat-peru/reportes-registros-acelerometricos>

Asimismo, el IGP cuenta con una plataforma web donde comparte la información de acelerómetros instalados en estructuras que registran su respuesta a las ondas sísmicas (ver Figura 41). Si se analiza estos registros, es posible evaluar el comportamiento dinámico de las estructuras y su vulnerabilidad sísmica. Además, los datos de los acelerómetros pueden ser utilizados para calibrar los modelos numéricos de las estructuras y mejorar su precisión en la predicción del daño sísmico.



## EDIFICACIONES INSTRUMENTADAS

Seleccione el distrito:

Mostrar  edificaciones

Nombre del edificio	Código	Distrito	Visualización
ESTABLECIMIENTO DE SALUD ALTO INCLAN SOTANO	AR01N	Arequipa	<a href="#">Ver (45)</a>
ESTABLECIMIENTO DE SALUD ALTO INCLAN AZOTEA	AR02N	Arequipa	<a href="#">Ver (44)</a>
UNIVERSIDAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA	BA01N	Barranco	<a href="#">Ver (129)</a>
EDIFICIO SER-K BARRANCO CLUB 2	BA03N	Barranco	<a href="#">Ver (33)</a>
EDIFICIO MOOD	BA04N	Barranco	<a href="#">Ver (61)</a>
EDIFICIO GRAU	BA05N	Barranco	<a href="#">Ver (18)</a>
MONUMENTO GRAU - HPC	BA06N	Barranco	<a href="#">Ver (32)</a>
EDIFICIO EL SOL 170	BA07N	Barranco	<a href="#">Ver (38)</a>
EDIFICIO EL SOL 135 SOTANO	BA08N	Barranco	<a href="#">Ver (57)</a>
EDIFICIO EL SOL 135 AZOTEA	BA09N	Barranco	<a href="#">Ver (56)</a>

Figura 41 Diez de las edificaciones instrumentadas del IGP en Lima Metropolitana con información disponible para descargar. Fuente: <https://www.igp.gob.pe/servicios/aceldat-peru/edificaciones-instrumentadas>

## 5. ZONAS URBANAS PARA LA APLICACIÓN

Como se ha mencionado anteriormente, la zona central del Perú, donde se encuentra Lima, está expuesta a un alto peligro sísmico por su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico y el silencio sísmico. En esta sección se presentarán algunas zonas más vulnerables ubicadas en la ciudad de Lima. Del grupo de zonas descritas, se elegirá una de ellas como piloto para realizar las simulaciones sísmicas a escala urbana.

### 5.1. San Borja

El distrito de San Borja tiene una población de 111,015 habitantes según datos del censo poblacional del año 2017 del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2018). Además, según INEI (2018), el material predominante de las paredes de las viviendas de este distrito son el ladrillo o el bloque de cemento.

En un estudio realizado por Tejada (2021) se identificó que el distrito se encuentra en una zona de depósitos de arena de compacidad media a densa o arcillas y limos de consistencia media. El nivel de peligro por sismo al que se encuentra expuesto el distrito es de nivel medio. Entre el tipo de edificaciones expuestas se identificaron viviendas, instituciones educativas y establecimientos de salud. En la Figura 42 se puede observar la extensión de las zonas que ocupa el distrito de San Borja dentro de la ciudad de Lima.

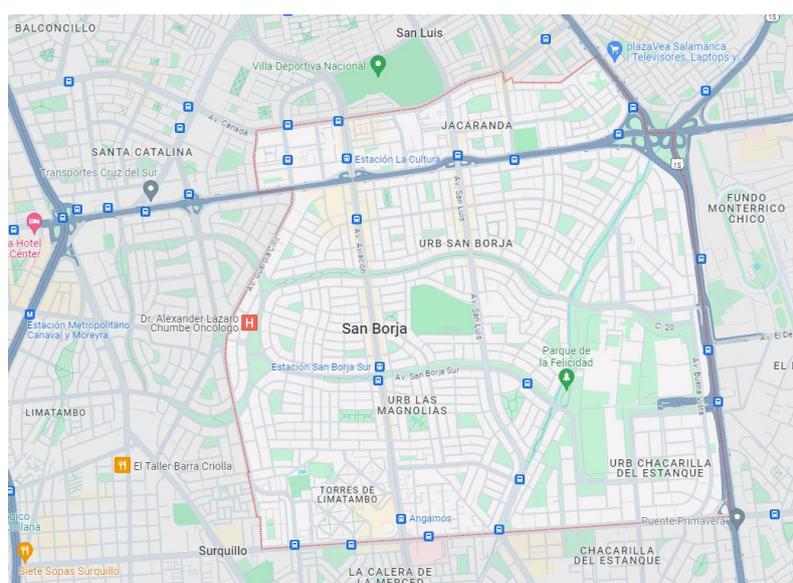


Figura 42 Distrito de San Borja (línea roja). Fuente: Google maps

Para esta zona urbana, se ha delimitado el área de estudio dentro del distrito de San Borja, cuya extensión se puede observar en la Figura 43. El área propuesta presenta un perímetro de 2.40 km y un área de 0.36 km<sup>2</sup>.



Figura 43 Área de estudio propuesta en el distrito de San Borja. Fuente: Google maps

Dentro del área delimitada se han identificado los ensayos geofísicos y geotécnicos disponibles, esta información se puede visualizar en la Figura 44.

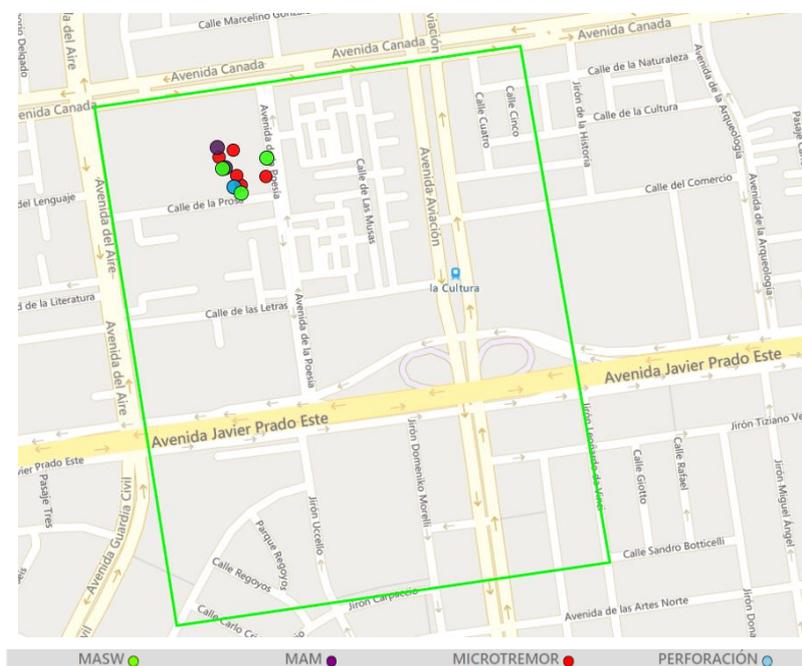


Figura 44 Ensayos geofísicos y geotécnicos disponibles en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Sencico - Ensayos Geofísicos (2020)

Además, también se identificaron las estaciones acelerográficas disponibles dentro del área de estudio. En la base de datos del Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024) se identificó a la estación SENCICO Lima-BORJA (ver Figura 45). Y, en la

base de datos de la plataforma AUDAS (2024) se identificaron dos estaciones acelerográficas, una en superficie y la segunda en un pozo (ver Figura 46).

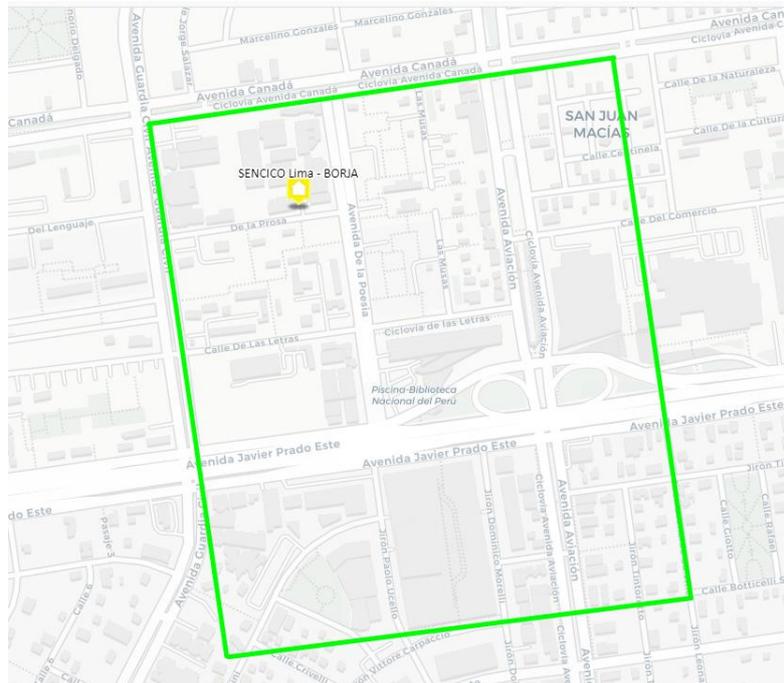


Figura 45 Estación acelerográfica disponible en la base de datos del CISMID. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024)

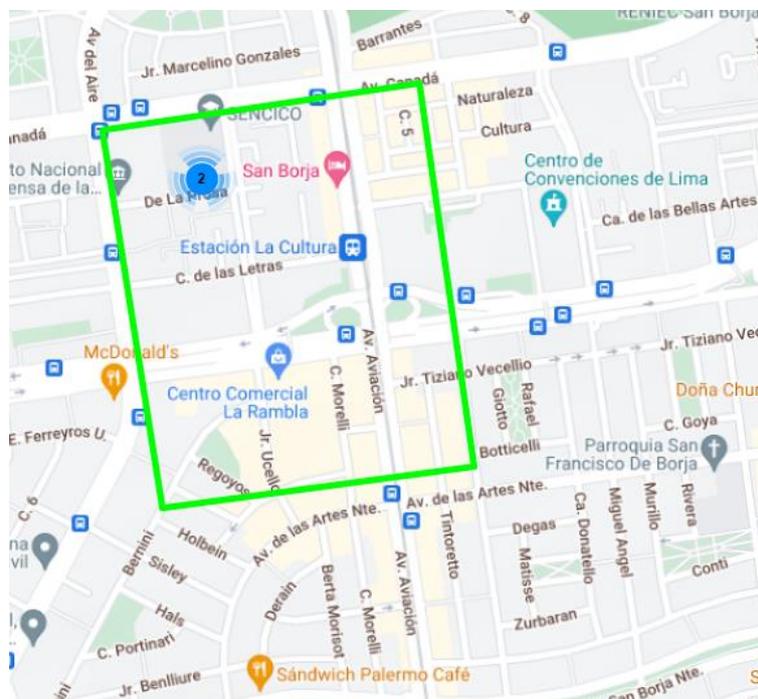


Figura 46 Estaciones acelerográficas disponibles en la base de datos de AUDAS. Fuente: AUDAS (2024)

También se identificó que en el año 2022 se llevó a cabo la instalación de cuatro sensores de aceleración en el edificio de SENCICO ubicado en el área de estudio propuesta (CISMID,

2022). En la Figura 47 se puede observar la ubicación de uno de los sensores en el edificio y el proceso de configuración que se llevó a cabo para el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo.



Figura 47 (a) Sensor de monitoreo instalado en el techo del edificio y (b) configuración del sistema de monitoreo. Fuente: CISMID, 2022.

Luego, se identificaron estructuras importantes ubicadas dentro del área de estudio, las cuales se listan a continuación:

- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO).
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL).
- Institución Educativa N° 7083 Manuel Gonzáles Prada.
- Biblioteca Nacional del Perú.
- Estación La Cultura de la Línea 1 del Metro de Lima.
- Gran Teatro Nacional.
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI).
- Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones (OSIPTEL).
- Centro comercial La Rambla.

Desde la Figura 48 hasta la Figura 56 se muestran las estructuras mencionadas.



Figura 48 Estructura de SENGICO en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps



Figura 49 Estructura de INACAL en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps



Figura 50 Estructura de la IE N° 7083 en el área de estudio del distrito de San Borja.  
Fuente: Google maps



Figura 51 Estructura de la Biblioteca Nacional del Perú en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps



Figura 52 Estructura de la estación de metro La Cultura en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps



Figura 53 Estructura del Gran Teatro Nacional área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps



Figura 54 Estructura de INDECOPI en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps



Figura 55 Estructura de OSIPTEL en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps



Figura 56 Estructura del centro comercial La Rambla en el área de estudio del distrito de San Borja. Fuente: Google maps

Finalmente, en la Figura 57 se muestra una foto general de las viviendas que se encuentran en el área de estudio.



Figura 57 Foto general de las viviendas en el área de estudio del distrito de San Borja.  
 Fuente: Google maps

## 5.2. Magdalena del Mar

El distrito de Magdalena del Mar se encuentra en el recorrido de la vía de la Costa Verde. La extensión de esta vía comprende el litoral sur limeño que va desde la Provincia Constitucional del Callao hasta el distrito de Chorrillos. En la Figura 58 se puede observar la ubicación y extensión de la Costa Verde.



Figura 58 Ubicación y extensión de la Costa Verde. Fuente: Mulatillo (2020)

Durante los primeros años de funcionamiento de la vía de la Costa Verde se reportaron constantes desprendimientos de roca a causa de sobrecargas en el acantilado, de las características físicas de los sedimentos y vibraciones del suelo. Recientemente, en el año 2019 se reportaron derrumbes en el acantilado de la Costa Ver, lo cual provocó el cierre temporal de la vía en el sentido sur a norte (ver Figura 59).



Figura 59 Desprendimiento de escombros en acantilado de la Costa Verde. Fuente: ANDINA (2019)

En la Figura 60 se puede observar las características de los acantilados de la Costa Verde en la zona de Magdalena del Mar, entre las cuales, resalta su pendiente elevada, y la presencia de gravas, arcillas, limos y depósitos de arena.



(a)



(b)

Figura 60 Acantilados en la Costa Verde en Magdalena del Mar: (a) presencia de arcilla y grava en el acantilado, (b) presencia de grava, arcilla, limo y depósitos aluviales en el acantilado. Fuente: Murguytio & Tanaka (2014)

Según INEI (2018) alrededor del 95% de las viviendas del distrito de Magdalena del Mar tienen como material predominante el ladrillo o bloque de cemento en sus paredes. Otro aspecto importante identificado en la zona es la antigüedad y falta de renovación de los sistemas de agua y desagüe, este problema provoca que estos servicios sean muy vulnerables ante la ocurrencia de un evento sísmico (Mulatillo, 2020).

Para esta zona urbana, se ha delimitado el área de estudio dentro de la Costa Verde, cuya extensión se puede observar en la Figura 61. El área propuesta presenta un perímetro de 2.40 km y un área de 0.36 km<sup>2</sup>. Dentro del área delimitada se han identificado los ensayos geofísicos disponibles, esta información se puede visualizar en la Figura 62.



Figura 61 Área de estudio propuesta en Magdalena del Mar. Fuente: Google maps



Figura 62 Ensayos geofísicos disponibles en el área de estudio de Magdalena del Mar.  
Fuente: Sencico - Ensayos Geofísicos (2020)

Además, también se identificó una estación acelerográfica disponible dentro del área de estudio (ver Figura 63).

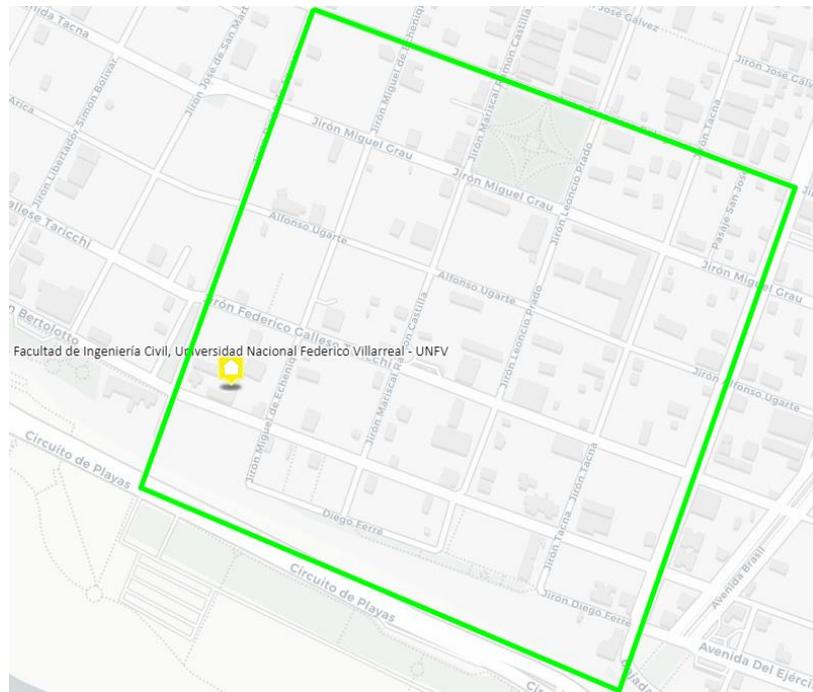


Figura 63 Estación acelerográfica disponible en el área de estudio de Magdalena del Mar.  
Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024)

Se identificó también la existencia de un modelo digital de elevación (DEM) realizado a partir de vuelos de drones. En la Figura 64 se puede ver dicha información para el área de la Costa Verde, dentro de la cual se encuentra el área de estudio en Magdalena del Mar.



Figura 64 Disponibilidad de modelos digitales de elevación en el área de Magdalena del Mar. Fuente: Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres - SIGRID (2019)

Luego, se identificaron estructuras importantes ubicadas dentro del área de estudio, las cuales se listan a continuación:

- Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV).
- Colegio Alejandro Deustua.
- Institución Educativa Francisco Bolognesi.
- Colegio José Antonio Encinas.
- Colegio Salesiano Rosenthal de la Puente.
- Institución Educativa Privada Nuestra Señora De La Paz.

Desde la Figura 65 hasta la Figura 67 se muestran las estructuras mencionadas.



Figura 65 Estructura de la UNFV en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps



Figura 66 Estructura del Colegio Alejandro Deustua en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps



Figura 67 Estructura de la IE Francisco Bolognesi en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps



Figura 68 Estructura del Colegio José Antonio Encinas en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps



Figura 69 Estructura del Colegio Salesiano Rosenthal de la Puente en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps



Figura 70 Estructura de la IEP Nuestra Señora De La Paz en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps

Finalmente, en la Figura 71 se muestra una foto general de las viviendas que se encuentran en el área de estudio.



Figura 71 Foto general de las viviendas en el área de estudio de Magdalena del Mar. Fuente: Google maps

### 5.3. Chorrillos

El distrito de Chorrillos cuenta con una población de 314,241 personas según el censo realizado por el INEI el año 2017 (INEI, 2018).

Estudios realizados por CISMID (2010) indican que el 90% de las viviendas del distrito de Chorrillos son de albañilería. El segundo material predominante es el concreto, que ocupa un 5% de las viviendas. En la Figura 72 se puede ver un resumen del tipo de material de las edificaciones en el distrito de Chorrillos.

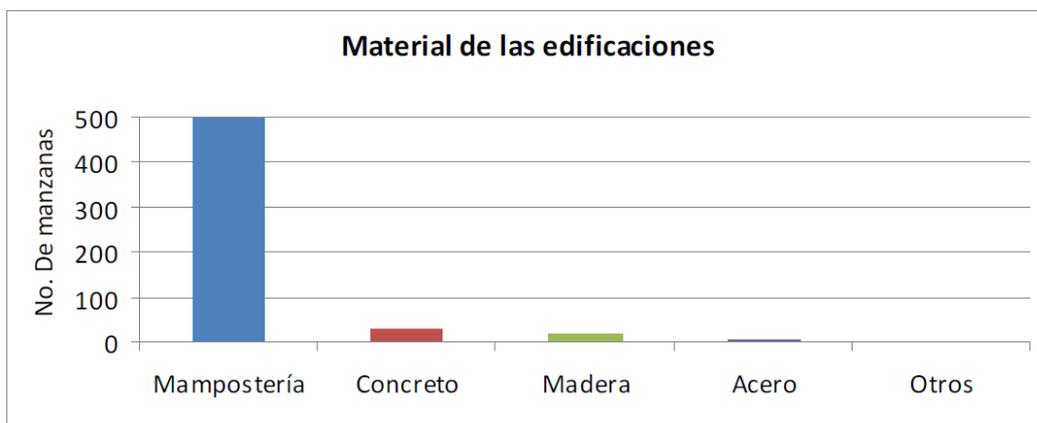


Figura 72 Ubicación y extensión de la Costa Verde. Fuente: CISMID (2010)

El estado de conservación de las viviendas de este distrito es bueno en un 56% de los casos, el 41% de las viviendas presenta un estado regular de y un 3% presenta un mal estado de conservación. En la Figura 72 se puede ver un resumen del estado de conservación de las edificaciones en el distrito de Chorrillos.

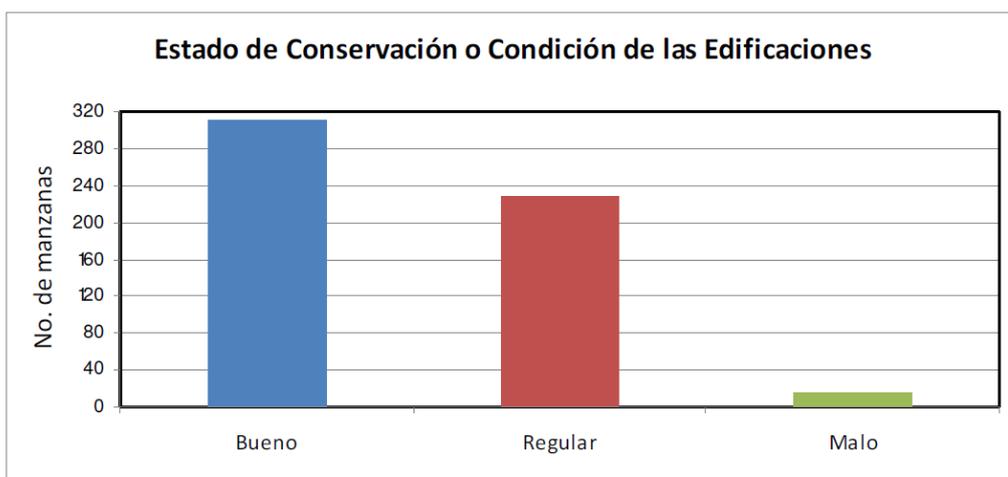


Figura 73 Ubicación y extensión de la Costa Verde. Fuente: CISMID (2010)

En la Figura 74 se puede observar la extensión de las zonas que ocupa el distrito de Chorrillos dentro de la ciudad de Lima.

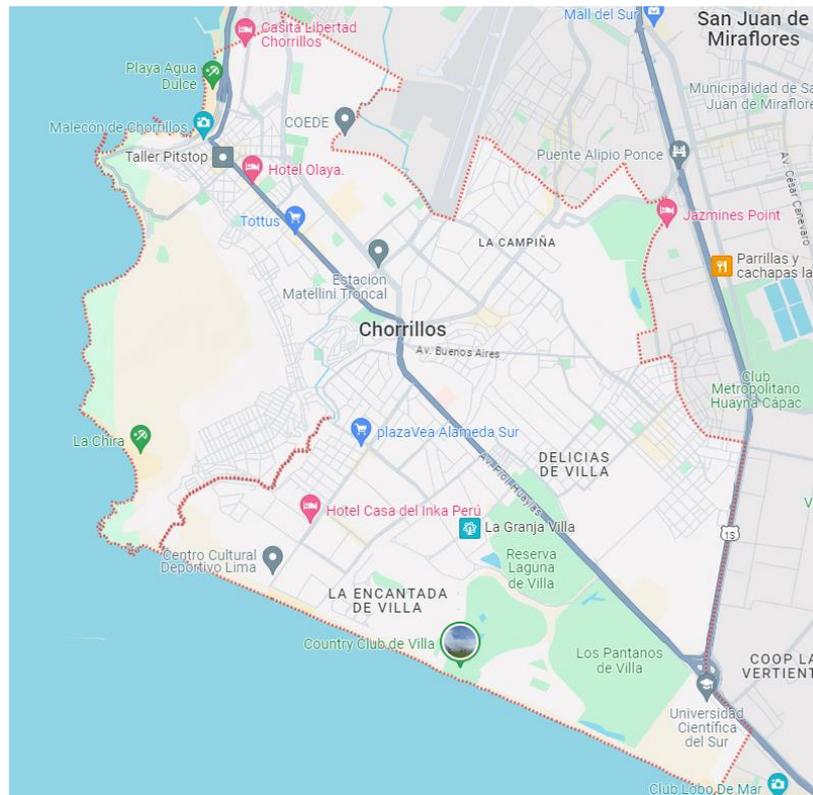


Figura 74 Distrito de Chorrillos (línea roja). Fuente: Google maps

Para la presente investigación, se ha delimitado el área de estudio dentro del distrito de Chorrillos cuya extensión se puede observar en la Figura 75. El área propuesta presenta un perímetro de 2.40 km y un área de 0.36 km<sup>2</sup>.

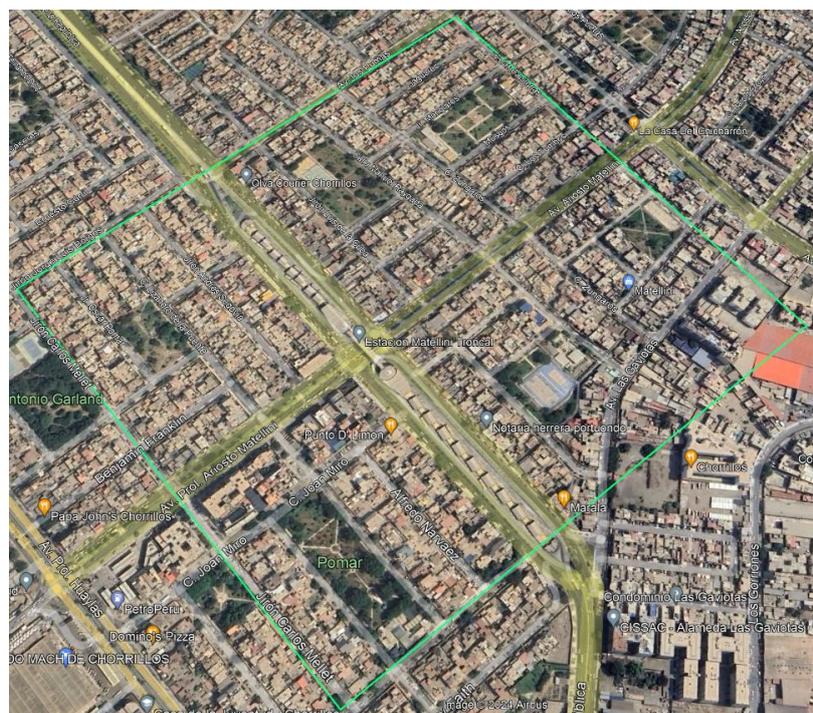


Figura 75 Área de estudio propuesta en el distrito de Chorrillos. Fuente: Google maps

Dentro del área delimitada se han identificado los ensayos geofísicos disponibles, esta información se puede visualizar en la Figura 76.

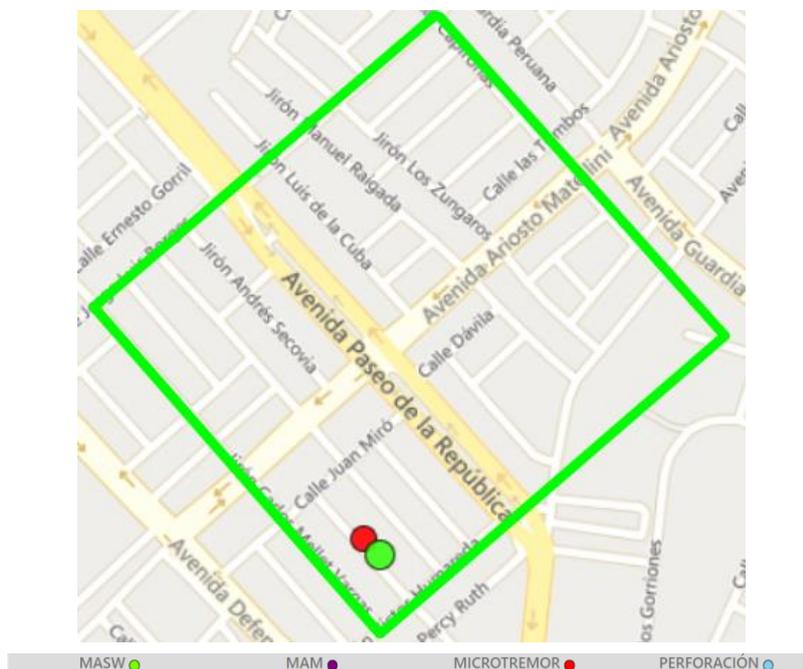


Figura 76 Ensayos geofísicos disponibles en el área de estudio del distrito de Chorrillos.

Fuente: Sencico - Ensayos Geofísicos (2020)

Además, también se identificó una estación acelerográfica disponible dentro del área de estudio (ver Figura 77).

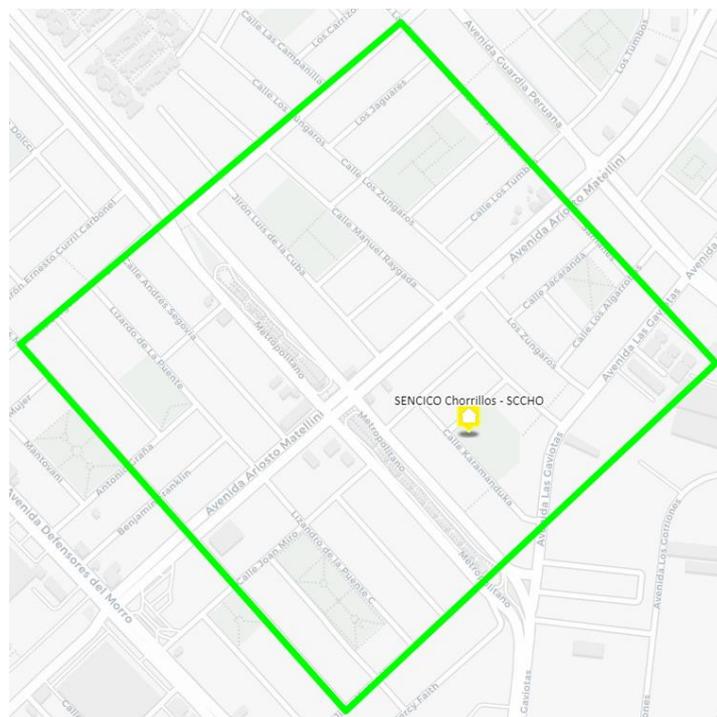


Figura 77 Estación acelerográfica disponible en el área de estudio del distrito de Chorrillos.

Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024)

Luego, se identificaron estructuras importantes ubicadas dentro del área de estudio, las cuales se listan a continuación:

- Servicio Nacional de la Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO).
- Estación Matellini del Metropolitano.
- Colegio Saint Patrick's School.



Figura 78 Estructura de la SENCICO en el área de estudio del distrito de Chorrillos. Fuente: Google maps

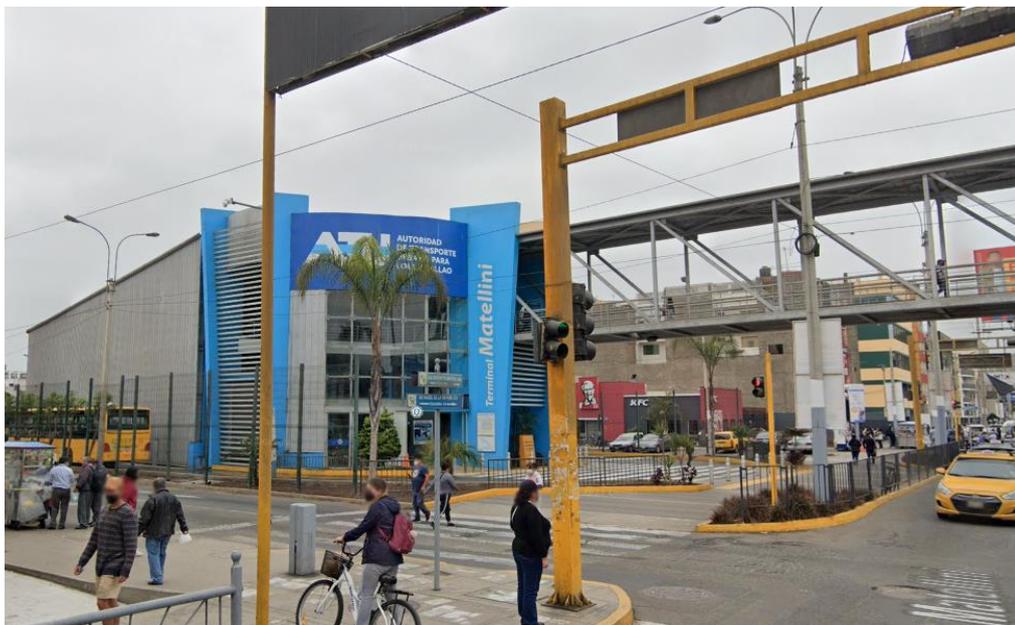


Figura 79 Estructura de la estación Matellini en el área de estudio del distrito de Chorrillos. Fuente: Google maps



Figura 80 Estructura del colegio Saint Patrick's School en el área de estudio del distrito de Chorrillos. Fuente: Google maps

Finalmente, en la Figura 81 se muestra una foto general de las viviendas que se encuentran en el área de estudio.



Figura 81 Foto general de las viviendas en el área de estudio del distrito de Chorrillos. Fuente: Google maps

#### 5.4. Rímac

El distrito de Rímac cuenta con una población de 174,785 personas según el censo realizado por el INEI el año 2017 (INEI, 2018). Además, según INEI (2018) el material predominante en este distrito es de ladrillo o bloque de cemento en alrededor del 81% de las viviendas. En la Figura 82 se puede observar en términos de porcentaje los materiales de construcción de las edificaciones en el distrito de Rímac.

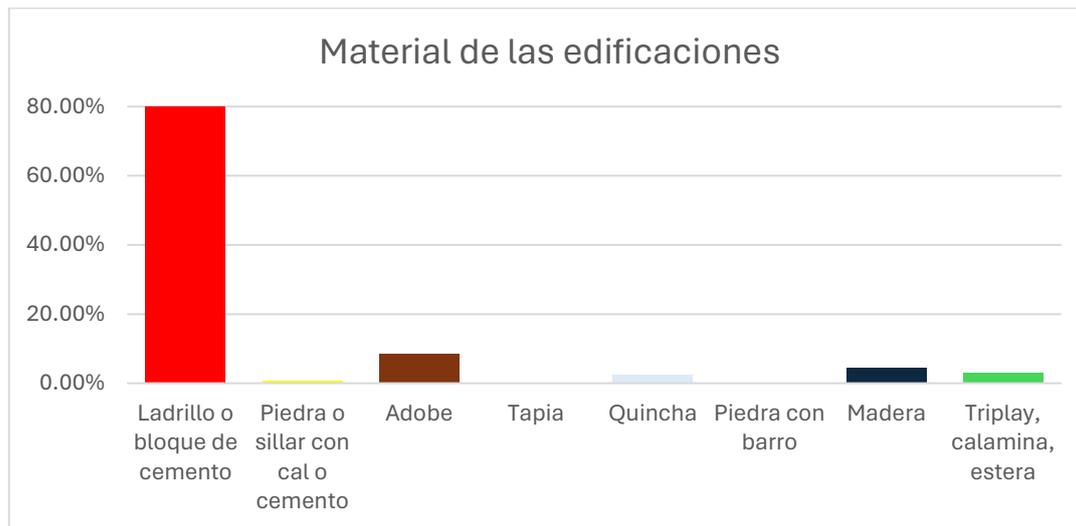


Figura 82 Material de las edificaciones en el distrito de Rímac. Fuente: INEI (2018)

En la Figura 83 se puede observar la extensión de las zonas que ocupa el distrito de Rímac dentro de la ciudad de Lima.

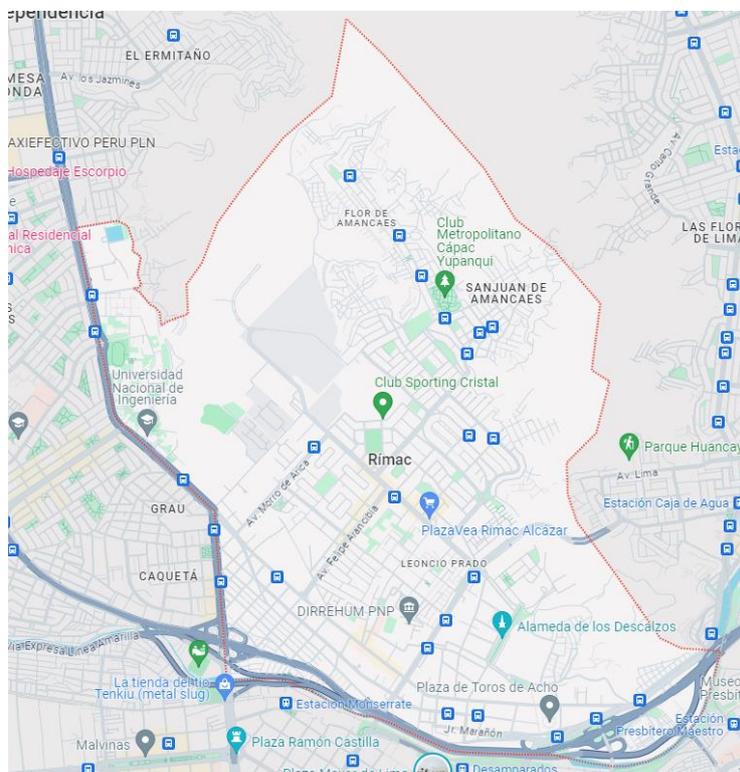


Figura 83 Distrito de Rímac (línea roja). Fuente: Google maps

Para la presente investigación, se ha delimitado el área de estudio dentro del distrito de Rímac, cuya extensión se puede observar en la Figura 84. El área propuesta presenta un perímetro de 2.40 km y un área de 0.36 km<sup>2</sup>.



Figura 84 Área de estudio propuesta en el distrito de Rímac. Fuente: Google maps

Dentro del área delimitada se han identificado los ensayos geofísicos disponibles, esta información se puede visualizar en la Figura 85.

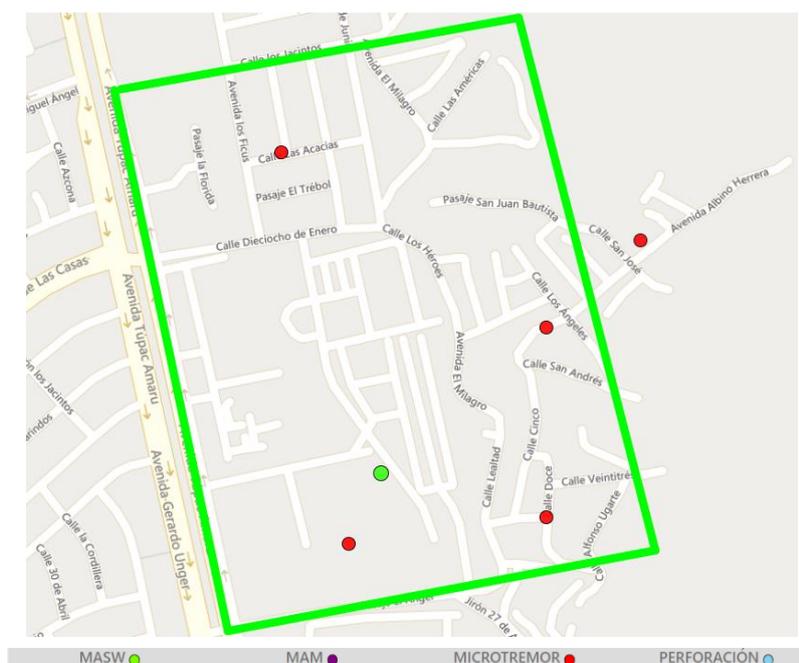


Figura 85 Ensayos geofísicos disponibles en el área de estudio del distrito de Rímac. Fuente: Sencico - Ensayos Geofísicos (2020)

Además, se identificó una estación acelerográfica disponible en el área de estudio (ver Figura 86). En esta figura también se puede observar la existencia de dos edificios monitoreados: el Laboratorio de Estructuras y el Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID.

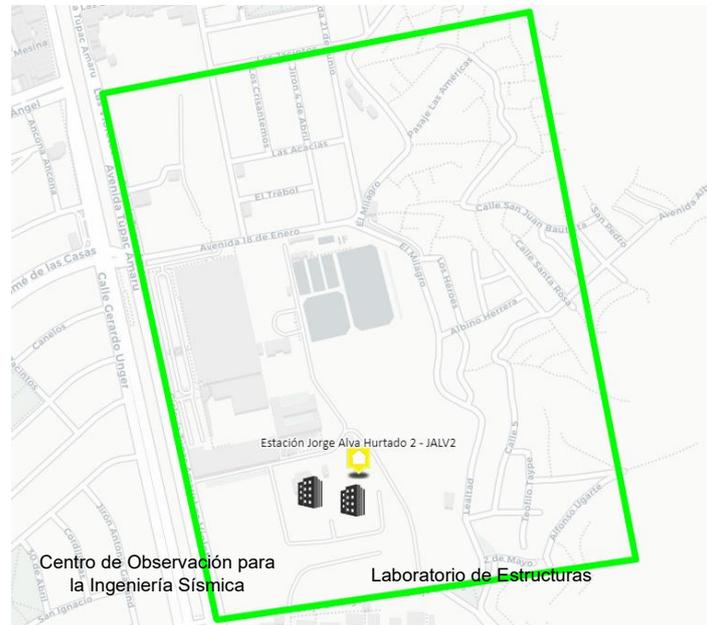


Figura 86 Estación acelerográfica y edificios monitoreados en el área de estudio del distrito de Rímac. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024)

Luego, se identificaron estructuras importantes ubicadas dentro del área de estudio, las cuales se listan a continuación:

- Centro de Estudios Preuniversitarios de la Universidad Nacional de Ingeniería (CEPREUNI).
- Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID).
- Centro comercial Metro.

Desde la Figura 87 hasta la Figura 89 se muestran las estructuras mencionadas.



Figura 87 Estructura del CEPREUNI en el área de estudio del distrito de Rímac. Fuente: Google maps



Figura 88 Estructura del CISMID en el área de estudio de Rímac. Fuente: Google maps



Figura 89 Estructura de Metro en el área de estudio de Rímac. Fuente: Google maps

Finalmente, en la Figura 90 se muestra una foto general de las viviendas que se encuentran en el área de estudio.



Figura 90 Foto general de viviendas en el área de estudio de Rímac. Fuente: Google maps

### 5.5. Zona para la aplicación piloto

En esta sección, se procederá a la selección de una zona piloto idónea para el desarrollo de la simulación numérica tridimensional de propagación de ondas sísmicas a escala urbana. La elección se realizará considerando la información disponible, así como la disponibilidad de instrumentación sísmica adecuada para la recolección de datos. A continuación, se definirá los valores mínimos recomendables de la información identificada para cada una de las zonas de estudio.

- Número de ensayos geofísicos

Anteriormente, en la sección 4.2 se definió que la cantidad recomendable de ensayos geofísicos por cada kilómetro cuadrado en las zonas de estudio sea igual a 11. Como se han propuesto 4 áreas de estudio con una extensión de  $0.36 \text{ km}^2$ , se puede calcular la cantidad mínima recomendable de ensayos.

$$N_e = 11 * 0.36 = 3.96, \Rightarrow N_e = 4 \text{ ensayos}$$

Donde:

$N_e$ : cantidad mínima recomendable de ensayos geofísicos

- Número de perforaciones geotécnicas

Anteriormente, en la sección 4.3 se definió que la cantidad recomendable de perforaciones geotécnicas por cada kilómetro cuadrado en las zonas de estudio sea igual a 6. Como se han propuesto 4 áreas de estudio con una extensión de  $0.36 \text{ km}^2$ , se puede calcular la cantidad mínima recomendable de perforaciones.

$$N_p = 6 * 0.36 = 2.16, \Rightarrow N_p = 3 \text{ perforaciones}$$

Donde:

$N_p$ : cantidad mínima recomendable de ensayos geofísicos

- Número de estaciones acelerográficas

Se considerará que la cantidad mínima recomendable de estaciones acelerográficas para un área de estudio de  $0.36 \text{ km}^2$  será igual a 3.

- Número de edificios monitoreados

Se considerará que la cantidad mínima recomendable de edificios monitoreados para un área de estudio de  $0.36 \text{ km}^2$  será igual a 1.

- Número de estructuras importantes

Se considerará que la cantidad mínima recomendable de estructuras importantes involucradas en la simulación numérica para un área de estudio de  $0.36 \text{ km}^2$  será igual a 9.

- Modelo digital de elevación

Se requerirá que exista un modelo digital de elevación del área de estudio.

Con base a los valores mínimos recomendables de la información requerida para la simulación numérica tridimensional de propagación de ondas sísmicas a escala urbana, se calcularán los puntajes para cada zona de estudio con la siguiente ecuación:

$$Puntaje = \min \left\{ \frac{Cantidad\ disponible}{Cantidad\ requerida}, 1 \right\}$$

De la ecuación anterior, se puede observar que el valor máximo que puede tomar el puntaje para cada información requerida es igual a la unidad. Esto quiere decir que en caso se cuente con la cantidad de información necesaria el puntaje asignado será igual a 1. En caso de que el puntaje para cierto criterio sea menor a 1, significa que aún sería necesario realizar más estudios relacionados a dicho criterio. Como se tienen 6 criterios de evaluación, el puntaje ideal para las zonas de estudio es igual a 6. Si una zona obtiene un puntaje igual a 6 quiere decir que cuenta con toda la información necesaria para realizar la simulación numérica.

En la Tabla 11 se resume la información requerida para las zonas propuestas.

Tabla 11 Resumen de información requerida

Información	Cantidad requerida
Número de ensayos geofísicos	4
Número de perforaciones geotécnicas	3
Número de estaciones acelerográficas	3
Número de edificios monitoreados	1
Número de estructuras importantes	9
Modelo digital de elevación que abarca toda el área de estudio	1

En la Tabla 12 se resume la información disponible para cada una de las zonas de estudio propuestas anteriormente.

Tabla 12 Resumen de información disponible para las zonas estudio propuestas

Información	San Borja	Magdalena del Mar	Chorrillos	Rímac
Número de ensayos geofísicos	10	3	2	5
Número de perforaciones geotécnicas	1	0	0	0
Número de estaciones acelerográficas	3	1	1	1
Número de edificios monitoreados	1	0	0	2
Número de estructuras importantes	9	6	3	3
Modelo digital de elevación	0	1	0	0

Luego de realizar el cálculo de puntajes como se mencionó anteriormente para cada uno de los criterios definidos, se realiza la suma total de puntos para cada una de las zonas, estos puntajes se pueden ver en la Tabla 13.

Tabla 13 Resumen de puntajes para las zonas estudio propuestas

Información	San Borja	Magdalena del Mar	Chorrillos	Rímac
Puntaje para el número de ensayos geofísicos	1.00	0.75	0.50	1.00
Puntaje para el número de perforaciones geotécnicas	0.33	0.00	0.00	0.00
Puntaje para el número de estaciones acelerográficas	1.00	0.33	0.33	0.33
Puntaje para el número de edificios monitoreados	1.00	0.00	0.00	1.00
Puntaje para el número de estructuras importantes	1.00	0.67	0.33	0.33
Puntaje para el número de modelos digitales de elevación	0.00	1.00	0.00	0.00
<b>PUNTAJE TOTAL</b>	<b>4.33</b>	<b>2.75</b>	<b>1.17</b>	<b>2.67</b>

Como se pudo observar en la tabla anterior, la zona de San Borja obtuvo el mayor puntaje total con un valor de 4.33, por lo tanto, se seleccionará dicha zona como piloto para la simulación numérica tridimensional de propagación de ondas sísmicas a escala urbana.

De la Tabla 13 se puede resaltar que se obtuvieron puntajes menores a la unidad para la zona seleccionada en los siguientes criterios:

- Número de perforaciones geotécnicas

Para este caso se obtuvo un puntaje de 0.33, lo cual corresponde a 1 perforación geotécnica. El valor mínimo requerido es de 3 perforaciones geotécnicas como se mostró en la Tabla 11. Por lo tanto, es necesario realizar por lo menos 2 perforaciones geotécnicas adicionales para completar la información faltante.

- Número de modelos digitales de elevación

Para este caso se obtuvo un puntaje de 0.00, lo cual corresponde a 0 modelos digitales de elevación. El valor mínimo requerido es de 1 modelo digital de elevación como se mostró en la Tabla 11. Por lo tanto, es necesario realizar por lo menos 1 modelo digital de elevación para completar la información faltante.

#### 5.6. Disponibilidad de laboratorios e Información para la aplicación piloto

En esta sección, se mencionarán los laboratorios disponibles para la simulación numérica y la información recopilada para la zona piloto establecida en el distrito de San Borja.

### 5.6.1. Disponibilidad de laboratorios

A continuación, se mencionarán los laboratorios de computación de alto rendimiento disponibles en el Perú. Donde se muestra que el máximo rendimiento computacional de estos es de alrededor de 20TFLOPS lo cual hoy en día puede alcanzarse utilizando computadoras para computación de alto rendimiento en la nube.

#### a) Centro de Alto Rendimiento Computacional de la Amazonía Peruana - MANATI

El Centro de Alto Rendimiento Computacional de la Amazonía Peruana es un laboratorio informático que tiene el fin de apoyar investigaciones científicas y tecnológicas que necesiten realizar el procesamiento de grandes volúmenes de información. Este laboratorio cuenta con un supercomputador denominado MANATI el cual cuenta con 280 núcleos de procesador de gran capacidad CPU Intel Xeon E5-2680 v4 2.40 GHz, con 1.2992 TFLOPS, 64 GB de memoria RAM por nodo, con 29952 núcleos CUDA core de procesamiento gráfico GPU NVIDIA TESLA K80 25 GB GDDR5 y un sistema de almacenamiento de 114 TB (IIAP, 2024).



Figura 91 Supercomputador MANATI. Fuente: IIAP (2024)

Las principales aplicaciones que se han realizado con este supercomputador han estado orientadas a temas como la deforestación, conservación de la biodiversidad, recursos hídricos, cambio climático, ordenamiento territorial, poblaciones indígenas, bioinformática y otros estudios (IIAP, 2024).

#### b) Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) – Khipu

El Centro de Investigación para la Computación Sostenible (COMPSUST) de la UTEC cuenta con un clúster dedicado a la computación de alto desempeño denominado Khipu. Este supercomputador cuenta con 160 núcleos de procesador de gran capacidad CPU Intel Xeon Gold 6130 2.10 GHz, y cada nodo tiene 128 GB de memoria RAM, con 40 núcleos de procesamiento gráfico GPU NVIDIA TESLA T4 16 GB GDDR6 y un sistema de almacenamiento de 40 TB (UTEC, 2024).

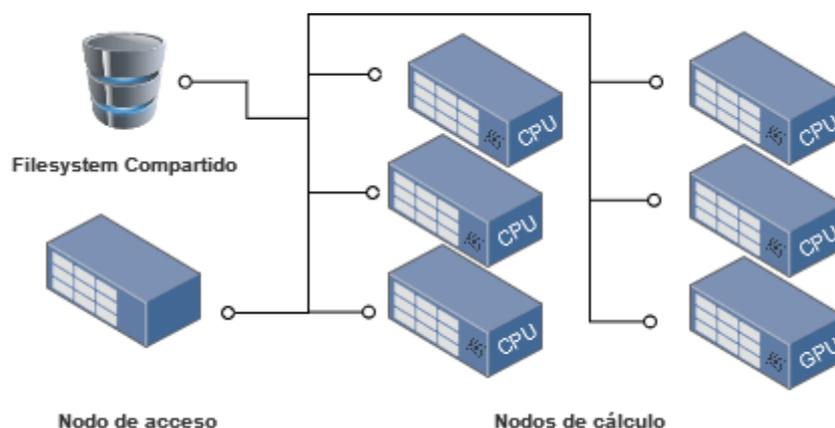


Figura 92 Estructura del supercomputador Khipu. Fuente: UTEC (2024)

Las principales aplicaciones que se han realizado con este supercomputador han estado orientadas a temas como análisis de la calidad del aire y sistemas de control aplicados a reactores (UTECH, 2024).

c) Instituto Geofísico del Perú (IGP) – HPC-Linux-Clúster

El IGP actualmente cuenta con un sistema computacional de alto rendimiento para la simulación de fluidos geofísicos denominado HPC-Linux-Clúster. El sistema HPC-Linux-Clúster cuenta con 552 núcleos computacionales CPU Intel Xeon E5-2680, puede alcanzar un pico de aproximadamente 20 TFLOPS y cuenta con una capacidad de almacenamiento de 400 TB (Montes et al., 2016).



Figura 93 HPC-Linux-Clúster en las instalaciones del IGP. Fuente: Montes et al. (2016)

Las principales aplicaciones a las que está orientado el uso de este supercomputador están relacionadas con el estudio de la dinámica de fluidos geofísicos (Montes et al., 2016).

### 5.6.2. Ensayos geofísicos

En esta sección se muestran la información de los ensayos geofísicos MAM y MASW disponibles en la zona piloto. Los ensayos de microtremores se pueden ver en los Anexos.

#### a) Ensayos MAM disponibles en la zona piloto

La Norma E. 030 de Diseño Sismorresistente (2018) clasifica a este tipo de suelo como 'S1'(Roca o Suelos muy Rígidos) que corresponde a una grava arenosa densa. La Norma ASCE 7-16 clasifica a este tipo de suelo como tipo 'B' que corresponde a 'Roca'.

#### i. 5-MAM

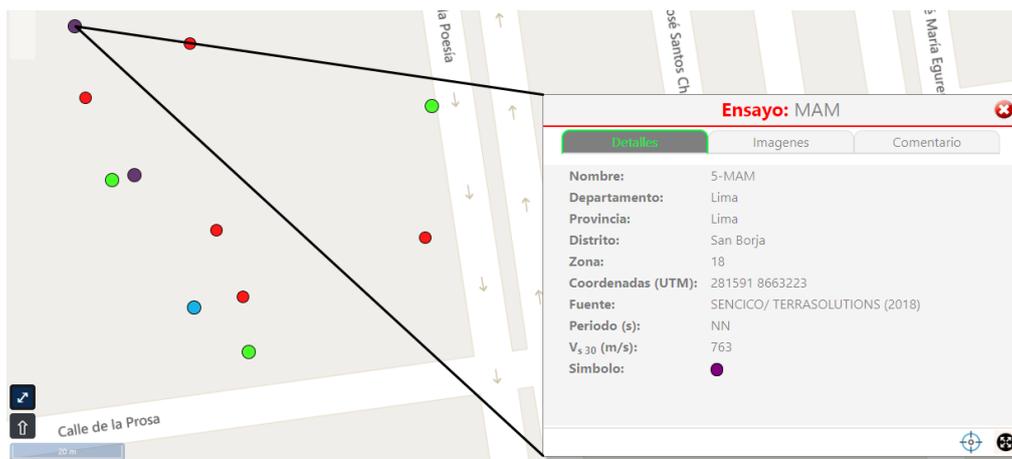


Figura 94 Ubicación del ensayo 5-MAM. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

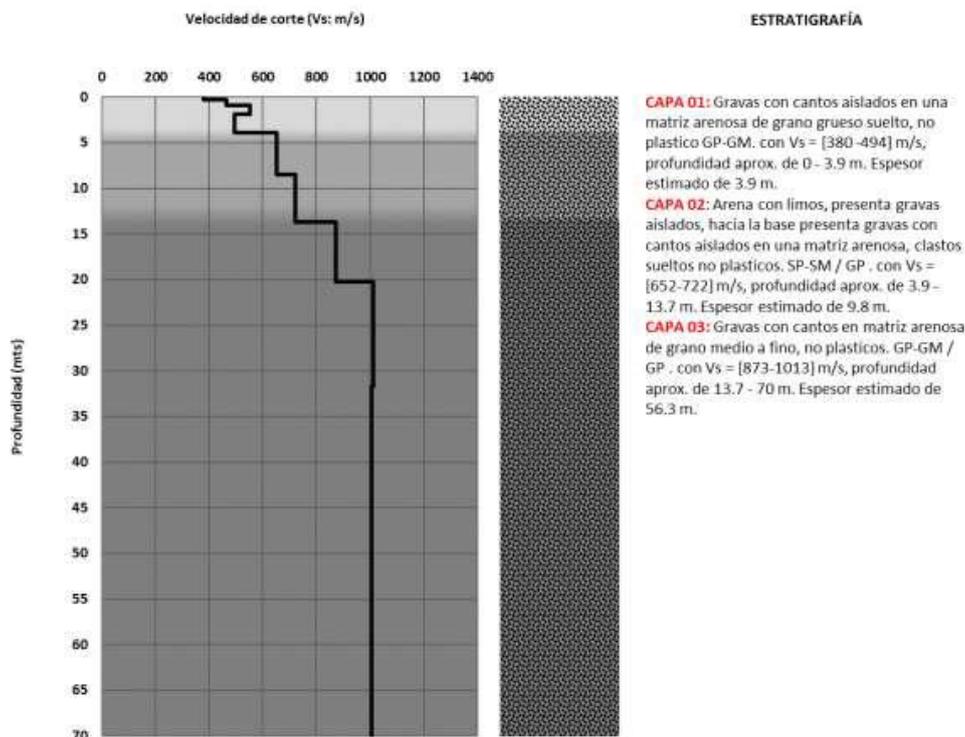


Figura 95 Perfil de velocidades de corte y estratigrafía del ensayo 5-MAM. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

ii. 6-MAM

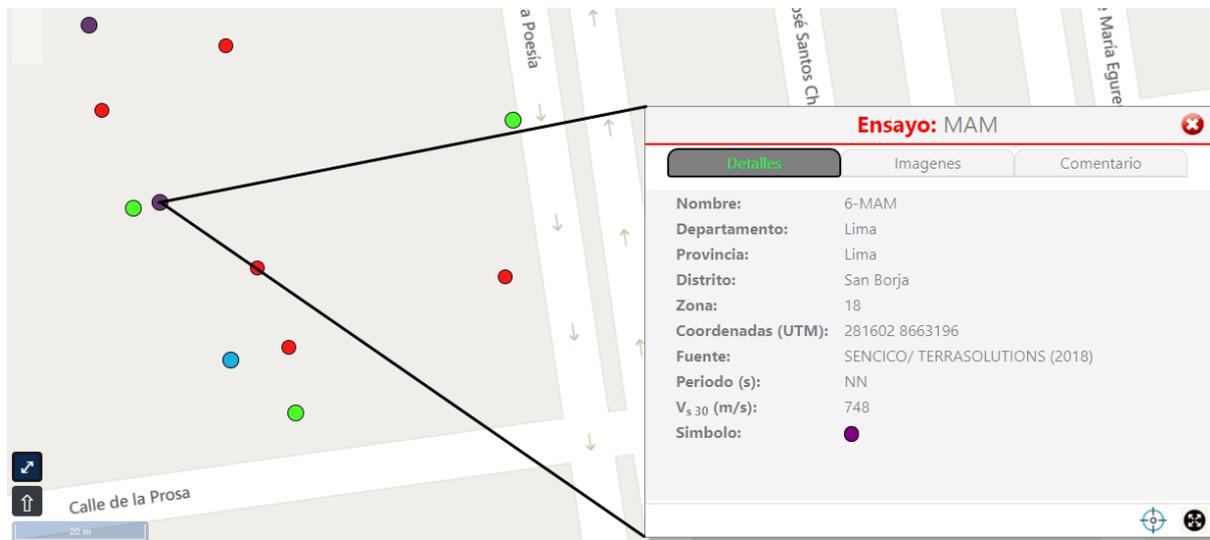


Figura 96 Ubicación del ensayo 6-MAM. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

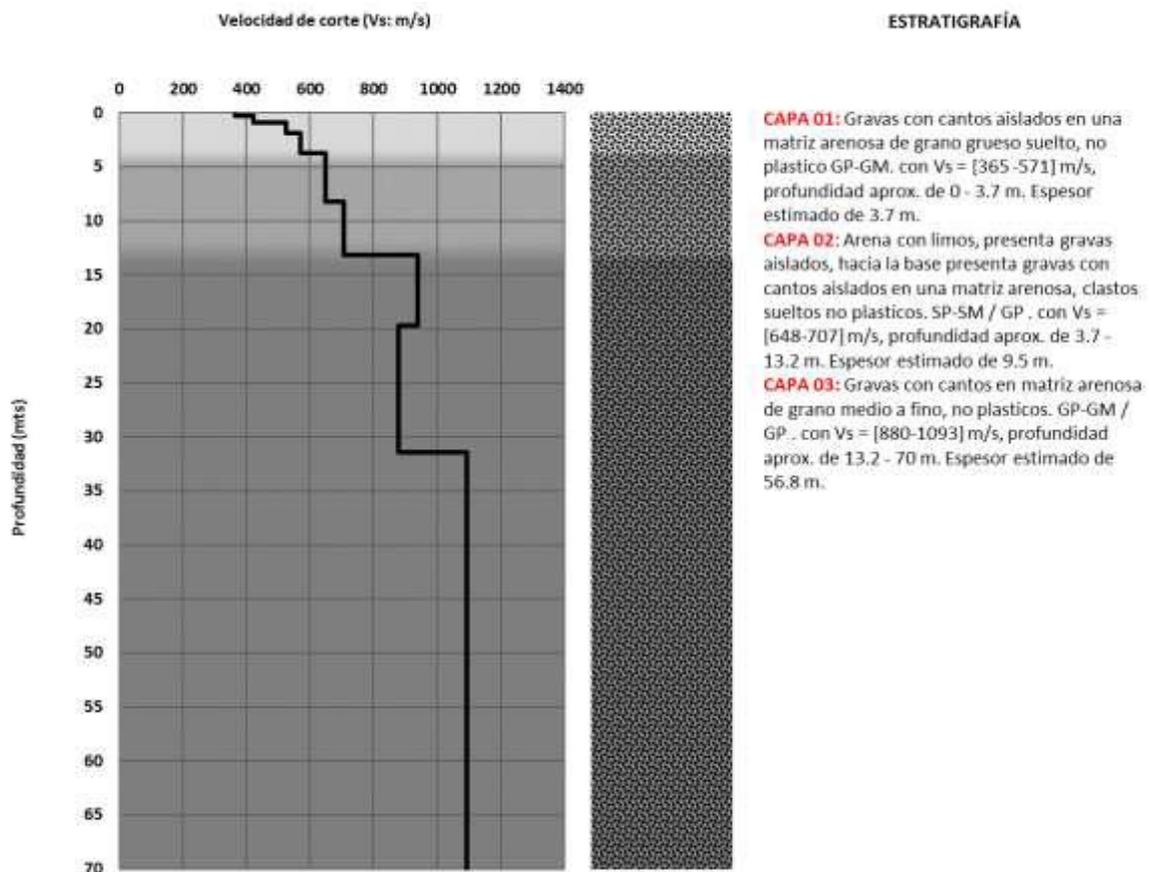


Figura 97 Perfil de velocidades de corte y estratigrafía del ensayo 6-MAM. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

b) Ensayos MASW disponibles en la zona piloto

La Norma E. 030 de Diseño Sismorresistente (2018) clasifica a este tipo de suelo como 'S1'(Roca o Suelos muy Rígidos) que corresponde a una grava arenosa densa. La Norma ASCE 7-16 clasifica a este tipo de suelo como tipo 'B' que corresponde a 'Roca'.

i. 23-MASW

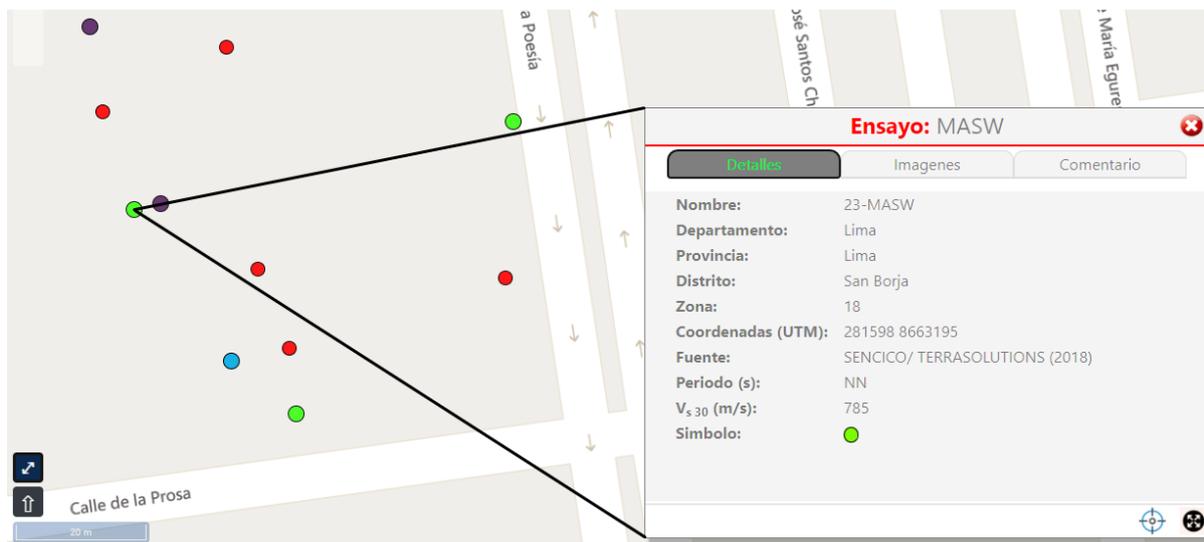


Figura 98 Ubicación del ensayo 23-MASW. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

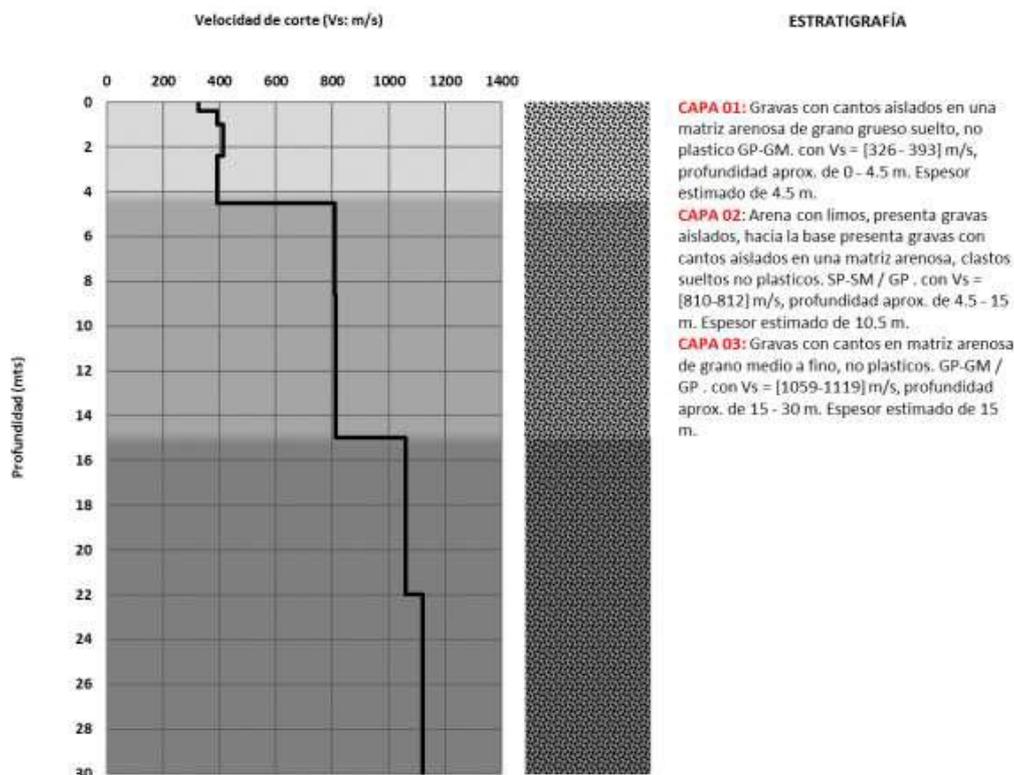


Figura 99 Perfil de velocidades de corte y estratigrafía del ensayo 23-MASW. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

ii. 24-MASW

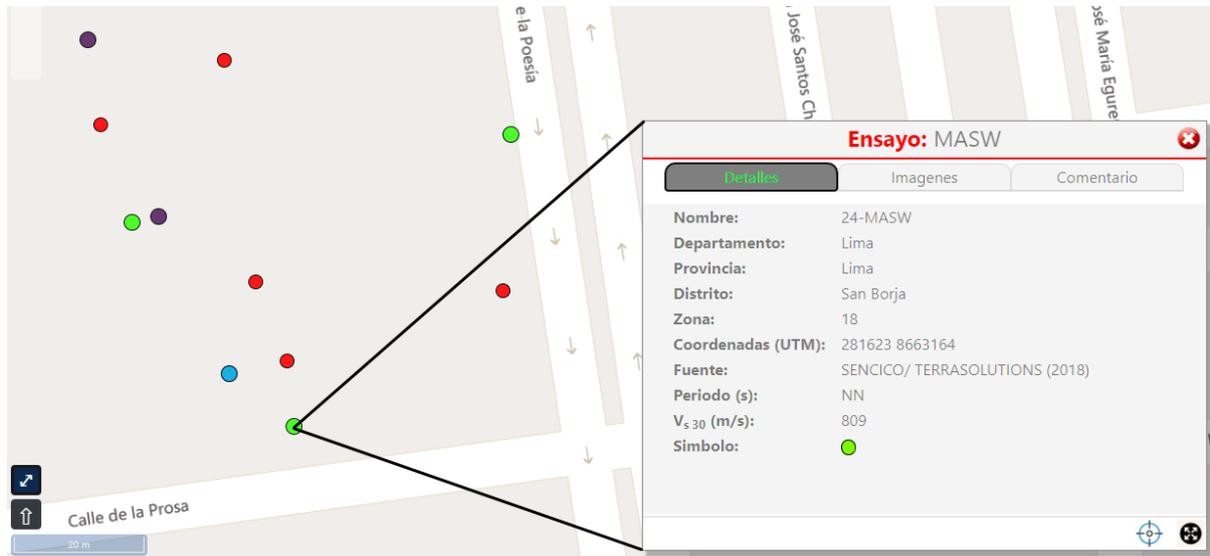


Figura 100 Ubicación del ensayo 24-MASW. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

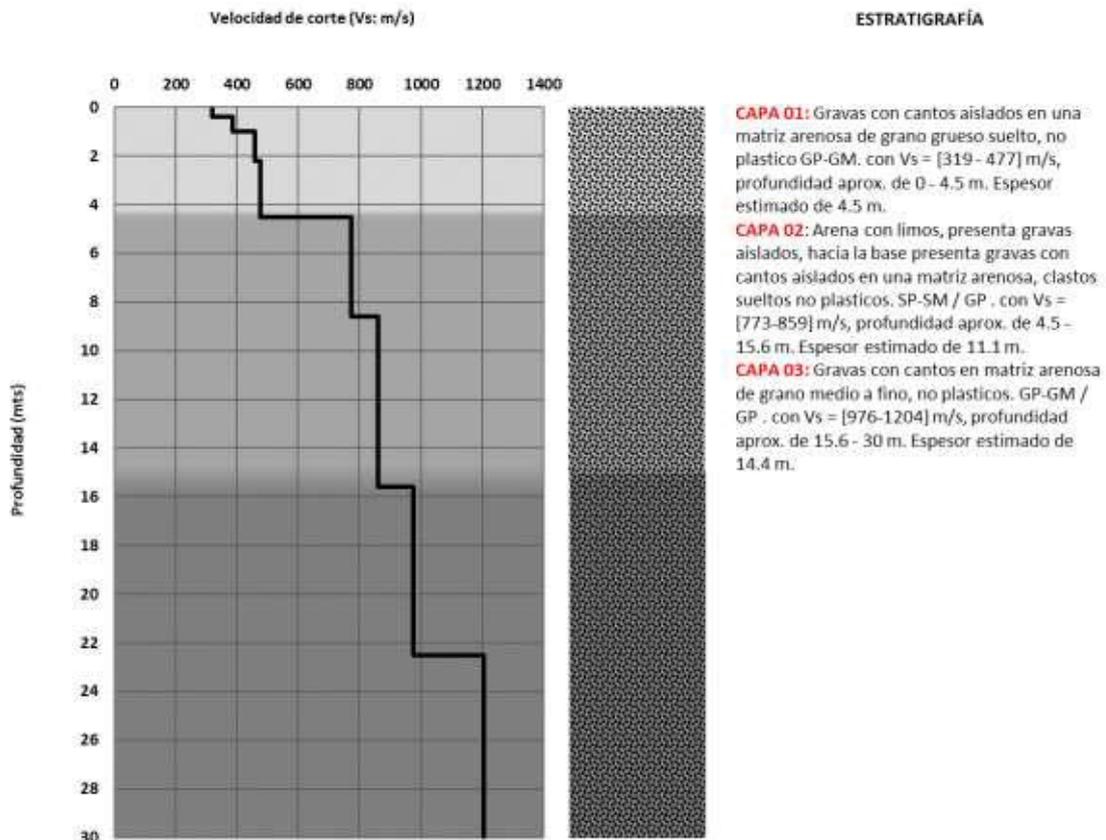


Figura 101 Perfil de velocidades de corte y estratigrafía del ensayo 24-MASW. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

iii. 25-MASW

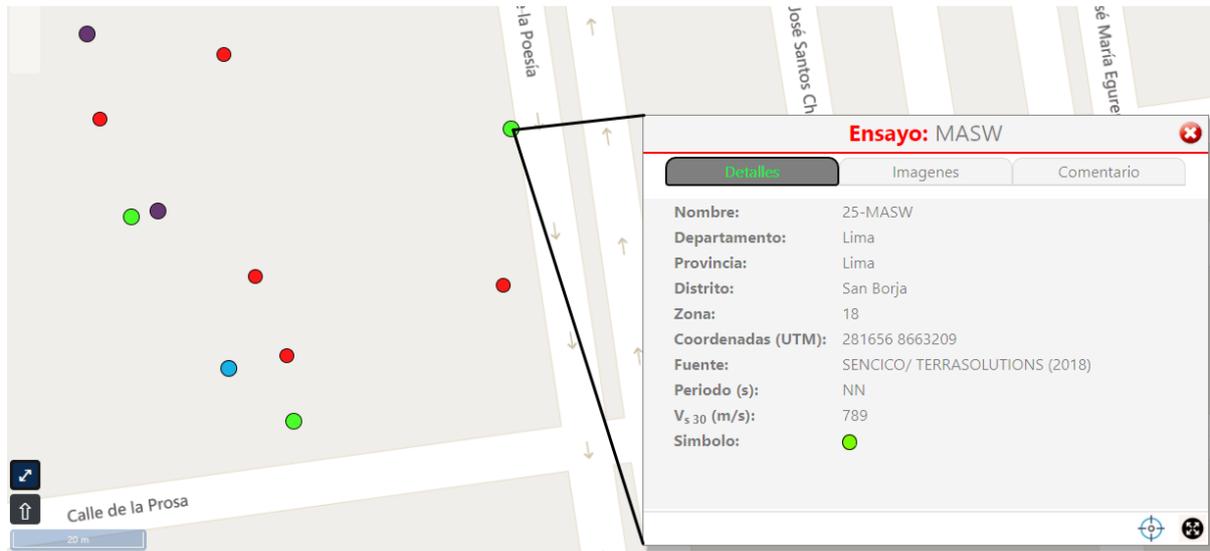


Figura 102 Ubicación del ensayo 25-MASW. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

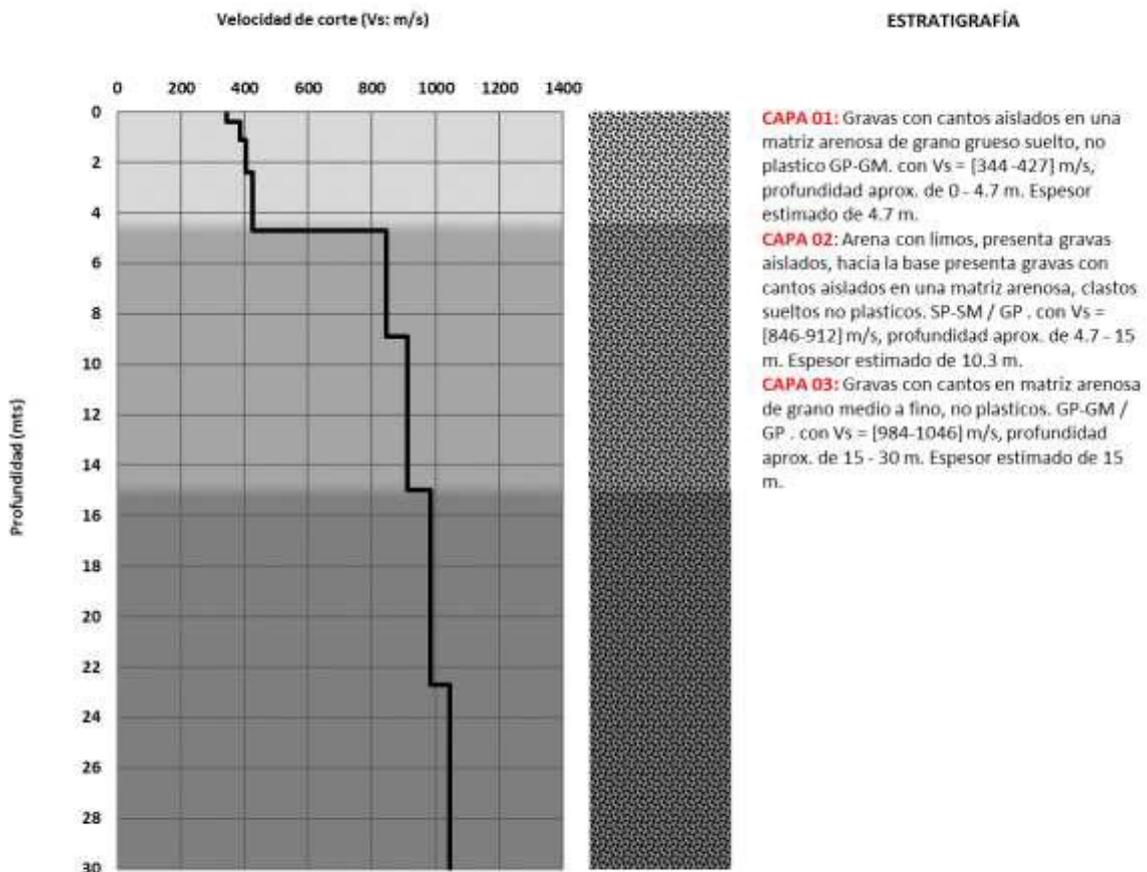


Figura 103 Perfil de velocidades de corte y estratigrafía del ensayo 25-MASW. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

### 5.6.3. Perforaciones geotécnicas

#### i. 3-PER

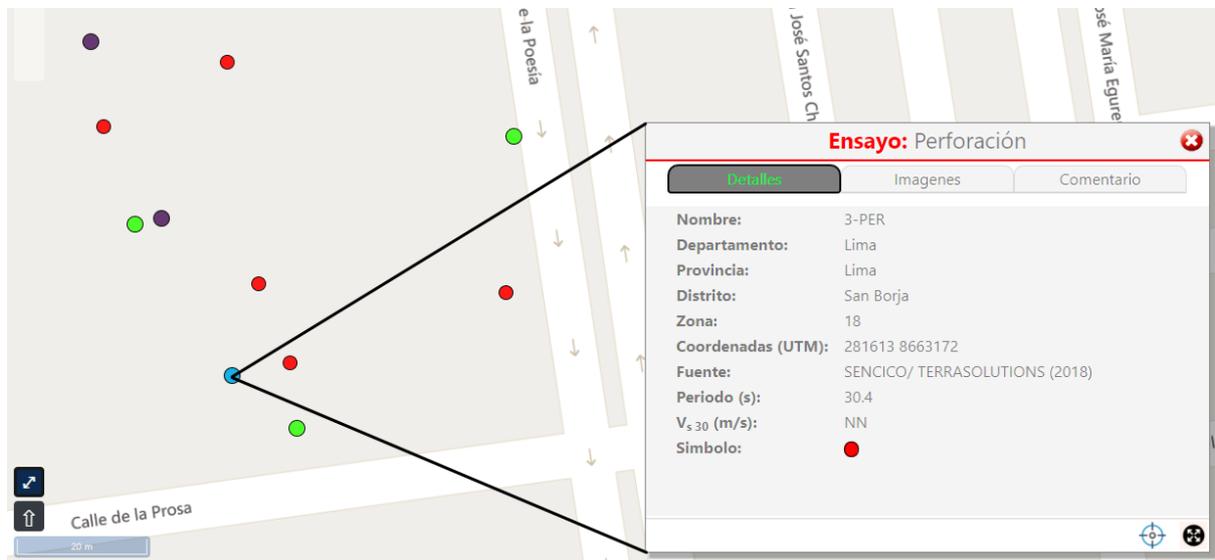


Figura 104 Ubicación de la perforación geotécnica 3-PER. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

## REGISTRO DE PERFORACION - 1 - LIMA

N° DE MUESTRA	PROF.	COLUMNA ESTRATIGRAFICA	SUCS	DESCRIPCION DEL SUELO	PROF.
	0.00 m	ESC: 1/75			0.00 m
	1.00		RELLENO	De 0.00 - 0.20 : Trozos de loza de concreto. De 0.20 - 0.60 : Relleno no controlado (limo con gravas color marrón claro, presencia de restos de CDs. De 0.60 - 1.00 : Gravas y cantos aislados en matriz areno limosa, suelta, no plástica. T <sub>max</sub> C 4", T <sub>max</sub> G 2 1/2", sub redondeadas, de naturaleza ígnea, tonalidad de gris a blanco grisáceo.	1.00
M-01	2.00		GP-GM	Gravas con canto aislado en una matriz arenosa de grano medio a fino, suelta, no plástica, seco. T <sub>max</sub> C 4 1/2". T <sub>max</sub> G 2", redondeada, sub redondeada, naturaleza ígnea, abigarrada. Contiene 60% de grava , 31% de arena y 9% de fino.	2.00
M-02	3.00		GP-GM	Gravas en matriz arenosa de grano medio a fino (El fino es por lavado de perforación), suelto, no plástico, seco. T <sub>max</sub> C 1 1/2", redondeada, sub redondeada, naturaleza ígnea, heterométrica, abigarrada. (CP-2 a 4.00 m). Contiene 68% de grava , 21% de arena y 11% de fino.	3.00
M-03	4.00		SP-SM	Areña pobremente gradada con limos, presenta gravas aisladas, seco, no plástico. La grava es suelta, no plástica, seco. T <sub>max</sub> C 4 1/2". T <sub>max</sub> G 2", sub redondeada, redondeada, naturaleza ígnea, heterométrica, color desde gris a blanco grisáceo. (CP-3 a 5.00 m). Contiene 36% de grava , 59% de arena y 5% de fino.	4.00
M-04	5.00		GP-GM	Gravas con canto aislado en matriz arenosa de grano medio a grueso y fino (fino por lavado de perforación), la matriz es suelta, seco, no plástica. La grava es suelta, no plástica, seco. T <sub>max</sub> C 3 1/4". T <sub>max</sub> G 2 3/4", sub redondeada, redondeada, naturaleza ígnea, heterométrica, color desde gris a blanco grisáceo. (CP-4 a 6.00 m). Contiene 95% de grava , 4% de arena y 1% de fino.	5.00
M-05	6.00		GP	Gravas con cantos aislados en una matriz arenosa de grano fino a medio (fino por lavado de perforación); clastos sueltos no plásticos, secos. T <sub>max</sub> C > 4 1/2". T <sub>max</sub> G 2 7/8", naturaleza ígnea, heterométrica, abigarrada, predominando la tonalidad gris. (CP-6 a 8.00 m). Contiene 81% de grava , 15% de arena y 4% de fino.	6.00
M-06	7.00		GP	Gravas con canto aislado en una matriz arenosa de grano fino a medio (fino por lavado de perforación), clastos sueltos no plásticos, secos. T <sub>max</sub> C 4". T <sub>max</sub> G 2", naturaleza ígnea, heterométrica, abigarrada, predominando la tonalidad gris. (CP-8 a 10.00 m). Contiene 78% de grava , 19% de arena y 3% de fino.	7.00
M-07	8.00		GP	Gravas con cantos aislados en una matriz arenosa de grano medio a fino (fino por lavado de perforación); fragmentos sueltos no plásticos, secos. T <sub>max</sub> C 6". T <sub>max</sub> G 2", naturaleza ígnea, heterométrica, abigarrada, predominando la tonalidad gris. (CP-10 a 12.00 m). Contiene 61% de grava , 34% de arena y 5% de fino.	8.00
M-08	9.00		GP-GM	Gravas con cantos en matriz arenosa grano medio a fino (fino por lavado de perforación), fragmentos sueltos, no plástica, secos. T <sub>max</sub> C 5 3/4". T <sub>max</sub> G 2", sub redondeada, redondeada, naturaleza ígnea, heterométrica, abigarrada con predominancia del gris a blanco grisáceo. (CP-12 a 14.00 m). Contiene 76% de grava , 18% de arena y 6% de fino.	9.00
M-09	10.00		GP-GM	Gravas con cantos en matriz arenosa grano medio a fino (fino por lavado de perforación), fragmentos sueltos, no plástica, secos. T <sub>max</sub> C 4". T <sub>max</sub> G 2", redondeada, sub redondeada, naturaleza ígnea, heterométrica, abigarrada con predominancia del gris a blanco grisáceo. (CP-13 a 15.00 m). Contiene 54% de grava , 36% de arena y 10% de fino.	10.00
M-10	11.00		GM	Gravas con cantos en matriz arenosa de grano fino a medio (fino por lavado de perforación), la matriz es de color pardo gris, Compacidad media, no plástica, seco. Los clastos son sueltos, no plástica, seco. T <sub>max</sub> C 5". T <sub>max</sub> G 2 1/8", redondeada a sub redondeada, naturaleza ígnea, heterométrica, abigarrada, predominando los matices grises. (CP-14 a 16.00 m). Contiene 53% de grava , 34% de arena y 13% de fino.	11.00
M-11	12.00		GP-GM	Gravas con cantos en matriz arenosa de grano fino a medio (fino por lavado de perforación), la matriz es de color pardo gris, Compacidad media, no plástica, seco. Los clastos son sueltos, no plástica, seco. T <sub>max</sub> C 3 1/2". T <sub>max</sub> G 2 7/8", redondeada, sub redondeada, naturaleza ígnea (volcánico, sub volcánico, intrusivo), heterométrica, abigarrada, predominando los matices grises. (CP-16 a 18.00 m). Contiene 43% de grava , 43% de arena y 12% de fino.	12.00
M-12	13.00		GP-GM	Gravas y cantos aislados en matriz arenosa. La matriz presenta Compacidad suelta a media, no plástica, seco, color pardo grisáceo en estado seco de grano medio a fino. Los clastos son sueltos, no plásticos, secos. T <sub>max</sub> C 3 1/2". T <sub>max</sub> G 2", redondeada, sub redondeada, naturaleza ígnea, pobremente gradada, tonalidad gris a gris blanquecino. Contiene 76% de grava , 19% de arena y 5% de fino.	13.00
M-13	14.00		GP-GM	Gravas y canto en matriz arenosa. La matriz presenta Compacidad suelta a media, no plástica, seco, color pardo grisáceo en estado seco de grano medio a fino. Los clastos son sueltos, no plásticos, secos. T <sub>max</sub> C 6". T <sub>max</sub> G 2 1/2", redondeada, sub redondeada, naturaleza ígnea, grava bien gradada, tonalidad gris a gris blanquecino. Contiene 60% de grava , 33% de arena y 7% de fino.	14.00
M-14	15.00		GP-GM	Gravas y canto en matriz arenosa. La matriz presenta Compacidad suelta a media, no plástica, seco, color pardo grisáceo en estado seco de grano medio a fino. Los clastos son sueltos, no plásticos, secos. T <sub>max</sub> C 6". T <sub>max</sub> G 2 3/8", redondeada, sub redondeada, naturaleza ígnea, grava pobremente gradada, tonalidad blanco grisáceo a gris. Contiene 81% de grava , 12% de arena y 7% de fino.	15.00
M-15	16.00		GP-GM	Gravas y canto en matriz arenosa. La matriz presenta Compacidad suelta a media, no plástica, seco, color pardo grisáceo en estado seco de grano medio a fino. Los clastos son sueltos, no plásticos, secos. T <sub>max</sub> C 7". T <sub>max</sub> G 2 1/2", redondeada, sub redondeada, naturaleza ígnea, heterométrica, tonalidad blanco grisáceo a gris. Contiene 66% de grava , 22% de arena y 12% de fino.	16.00
M-16	17.00		GP	Gravas y canto en matriz arenosa. La matriz presenta Compacidad suelta a media, no plástica, seco, color pardo grisáceo en estado seco de grano medio a fino. Los clastos son sueltos, no plásticos, secos. T <sub>max</sub> C 3 1/8". T <sub>max</sub> G 2", redondeada, sub redondeada, naturaleza ígnea, heterométrica, tonalidad blanco grisáceo a gris. Contiene 84% de grava , 15% de arena y 1% de fino.	17.00
M-17	18.00		GP-GM	Gravas y canto en matriz arenosa. La matriz presenta Compacidad suelta a media, no plástica, seco, color pardo grisáceo en estado seco de grano medio a fino. Los clastos son sueltos, no plásticos, secos. T <sub>max</sub> C 7". T <sub>max</sub> G 2 1/2", redondeada, sub redondeada, naturaleza ígnea, grava pobremente gradada, tonalidad gris claro a gris. Contiene 86% de grava , 11% de arena y 3% de fino.	18.00
M-18	19.00		GP	Gravas y canto en matriz arenosa. La matriz presenta Compacidad suelta a media, no plástica, seco, color pardo grisáceo en estado seco de grano medio a fino. Los clastos son sueltos, no plásticos, secos. T <sub>max</sub> C 5 1/2". T <sub>max</sub> G 2 3/4", redondeada, sub redondeada, naturaleza ígnea, grava pobremente gradada, tonalidad gris claro a gris. Contiene 79% de grava , 13% de arena y 8% de fino.	19.00

Figura 105 Columna estratigráfica de la perforación geotécnica 3-PER. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

#### 5.6.4. Registros acelerográficos

A continuación, se mostrarán los registros acelerográficos obtenidos en las estaciones acelerográficas identificadas en la zona piloto. Estos registros fueron obtenidos de la base de datos del CISMID y de AUDAS.

i. SISMO 14/04/2024 08:56:47 Provincia Constitucional del Callao – Lima M4.8

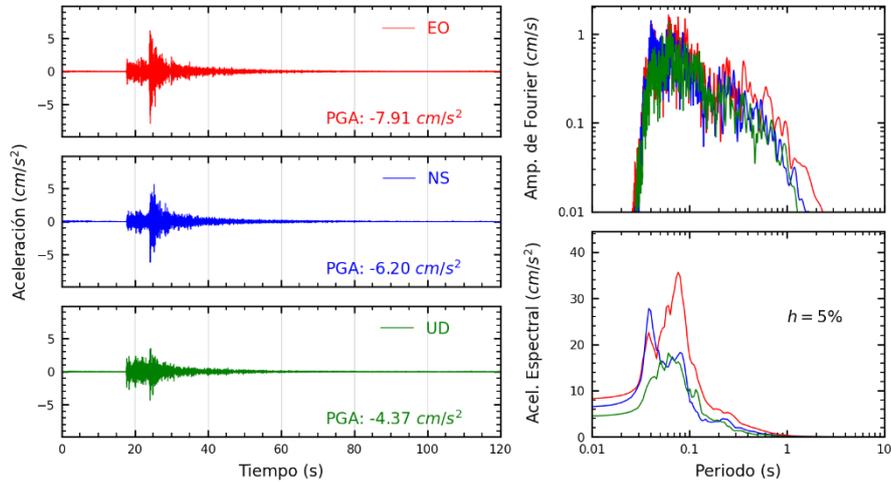


Figura 106 Registros acelerográficos de la base de datos del CISMID para el sismo de la Provincia Constitucional del Callao 14/04/2024. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024)

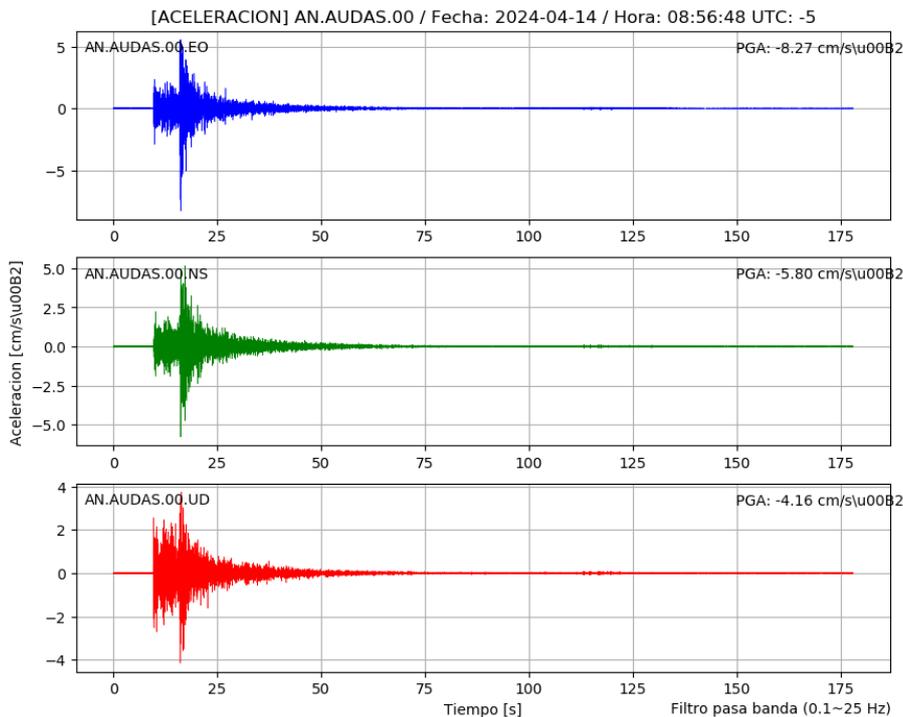


Figura 107 Registros acelerográficos de la base de datos del AUDAS00 para el sismo de la Provincia Constitucional del Callao 14/04/2024. Fuente: AUDAS (2024)

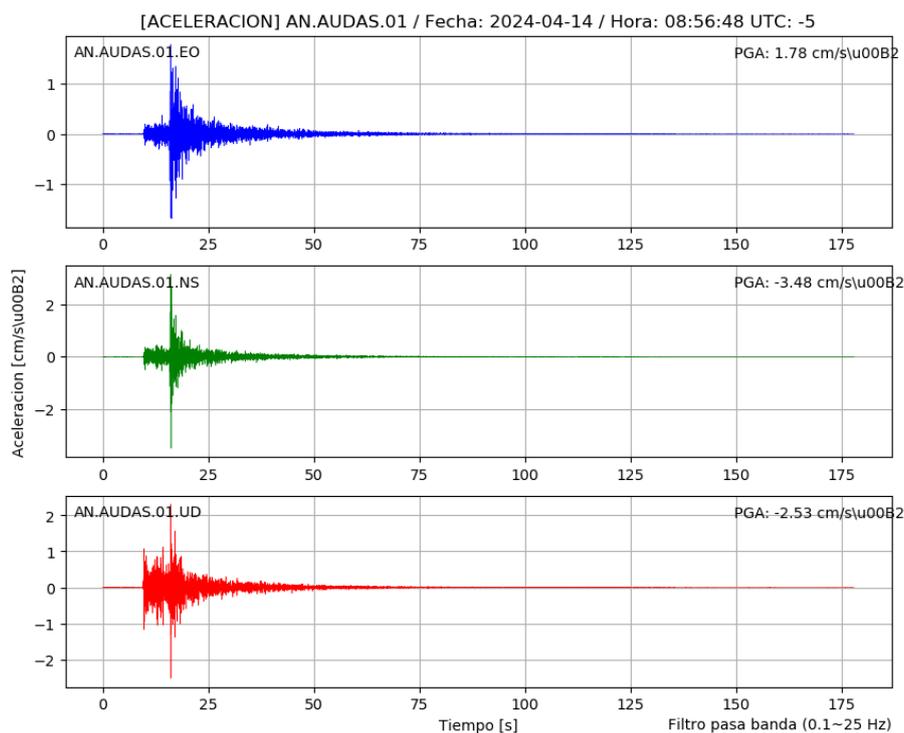


Figura 108 Registros acelerográficos de la base de datos del AUDAS01 para el sismo de la Provincia Constitucional del Callao 14/04/2024. Fuente: AUDAS (2024)

ii. SISMO 15/02/2024 15:53:35 Huaral – Lima M5.4

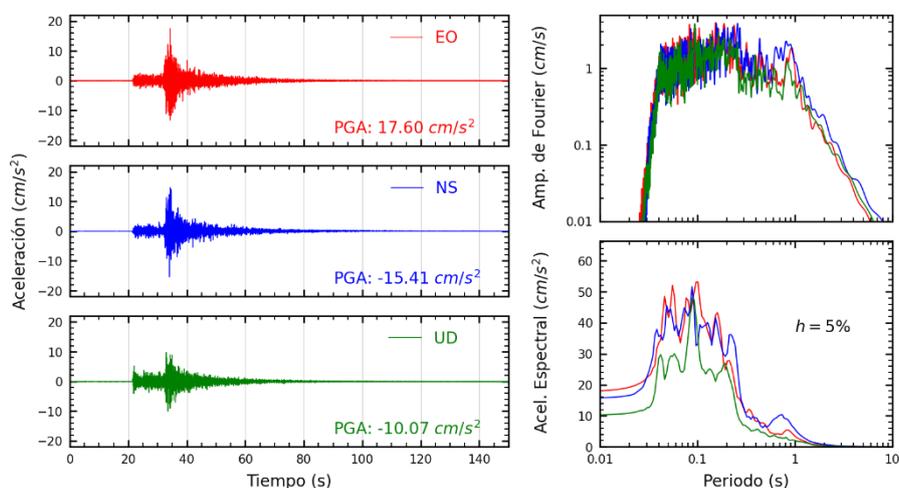


Figura 109 Registros acelerográficos de la base de datos del CISMID para el sismo de Huaral 15/02/2024. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024)

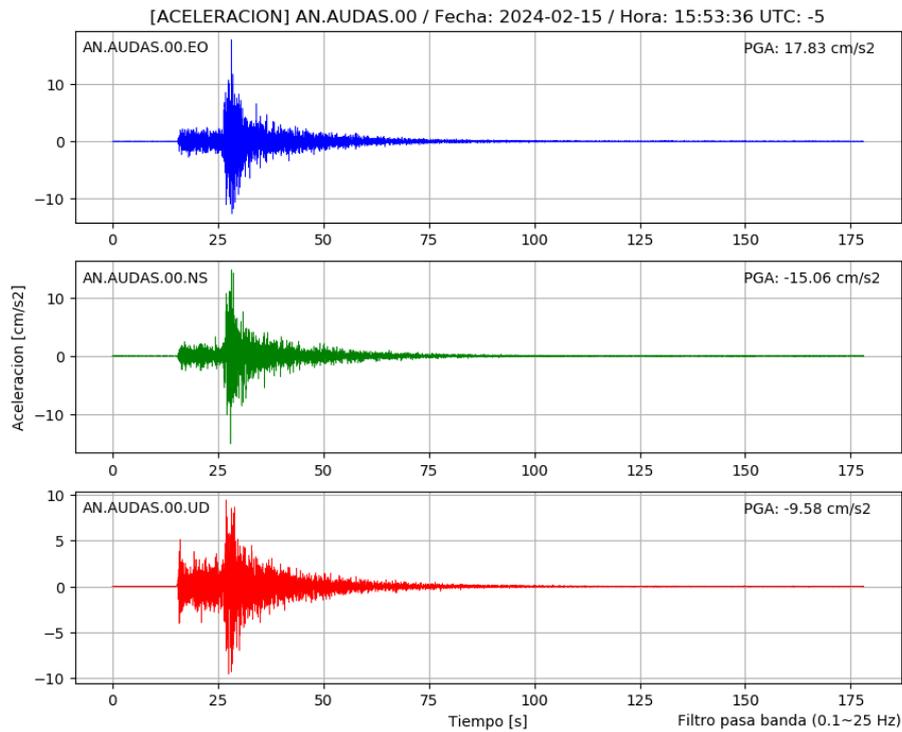


Figura 110 Registros acelerográficos de la base de datos del AUDAS00 para el sismo de Hualal 15/02/2024. Fuente: AUDAS (2024)

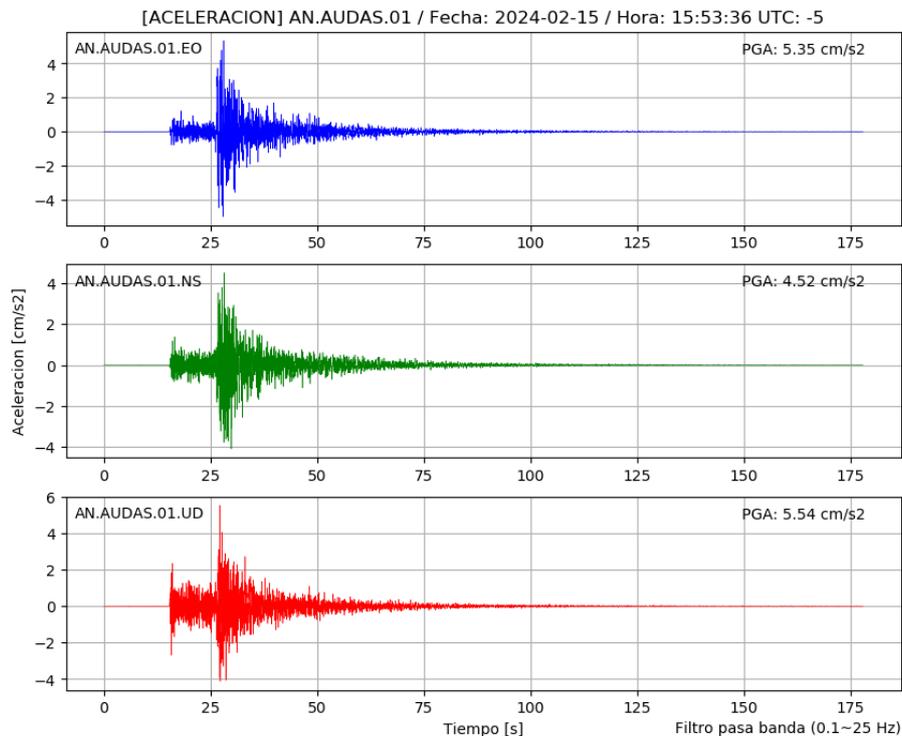


Figura 111 Registros acelerográficos de la base de datos del AUDAS01 para el sismo de Hualal 15/02/2024. Fuente: AUDAS (2024)

iii. SISMO 12/02/2022 16:55:48 Chilca – Lima M5.5

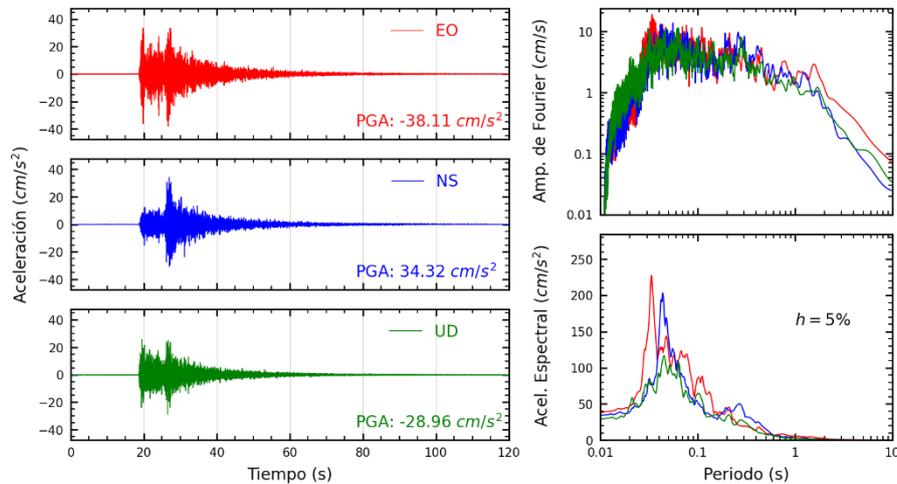


Figura 112 Registros acelerográficos de la base de datos del CISMID para el sismo de Chilca 12/02/2022. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024)

Para este sismo no se encontró información en la base de datos de AUDAS.

iv. SISMO 07/01/2022 05:27:05 Lima – Lima M5.6

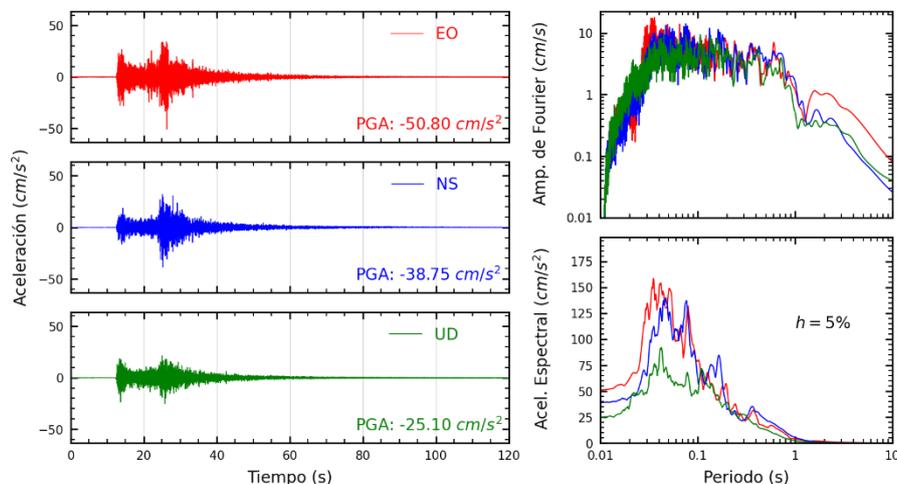


Figura 113 Registros acelerográficos de la base de datos del CISMID para el sismo de Lima 07/01/2022. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024)

Para este sismo no se encontró información en la base de datos de AUDAS.

v. SISMO 22/06/2021 21:54:18 Mala – Lima M6

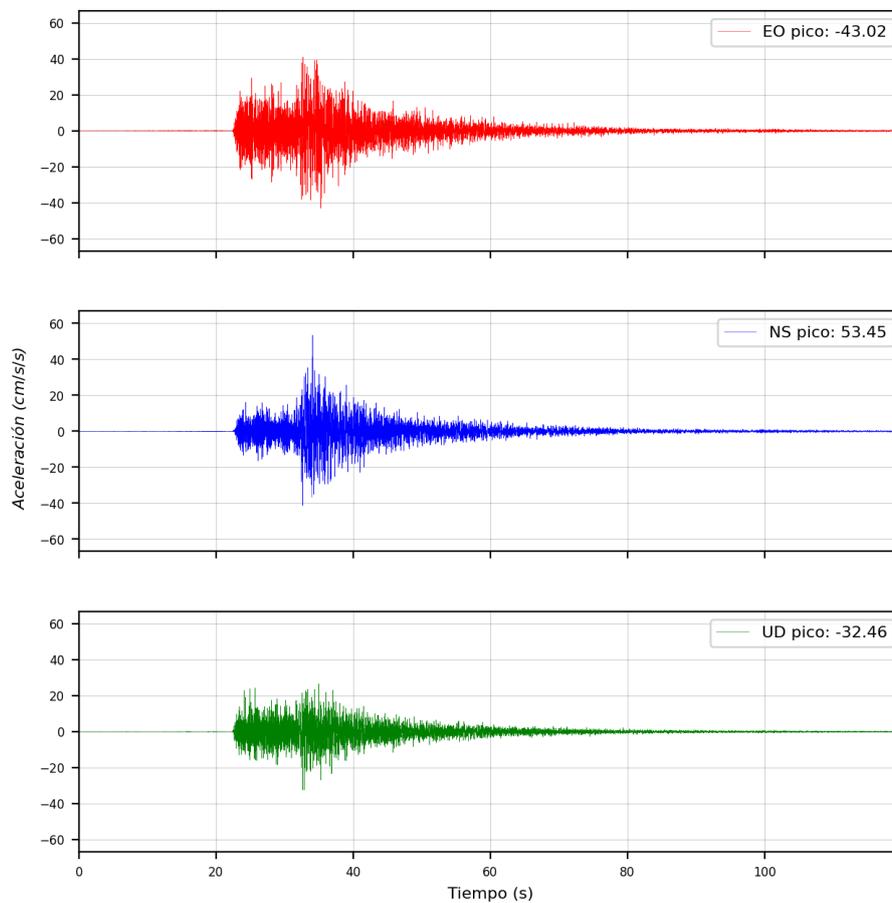


Figura 114 Registros acelerográficos de la base de datos del CISMID para el sismo de Mala 22/06/2021. Fuente: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID (2024)

Para este sismo no se encontró información en la base de datos de AUDAS.

## 6. EVALUACIÓN SISMICA UTILIZANDO SIMULACIONES NUMÉRICAS 3D

Basándonos en los principios establecidos en los capítulos previos, se presenta en esta sección una metodología para la evaluación sísmica empleando simulaciones numéricas tridimensionales. Es crucial destacar la necesidad de validar esta metodología mediante la comparación con trabajos de campo y ensayos experimentales llevados a cabo por reconocidos centros de investigación en el ámbito de la evaluación de riesgos sísmicos.

### 6.1. Metodología

La metodología se puede ilustrar en la Figura 115:

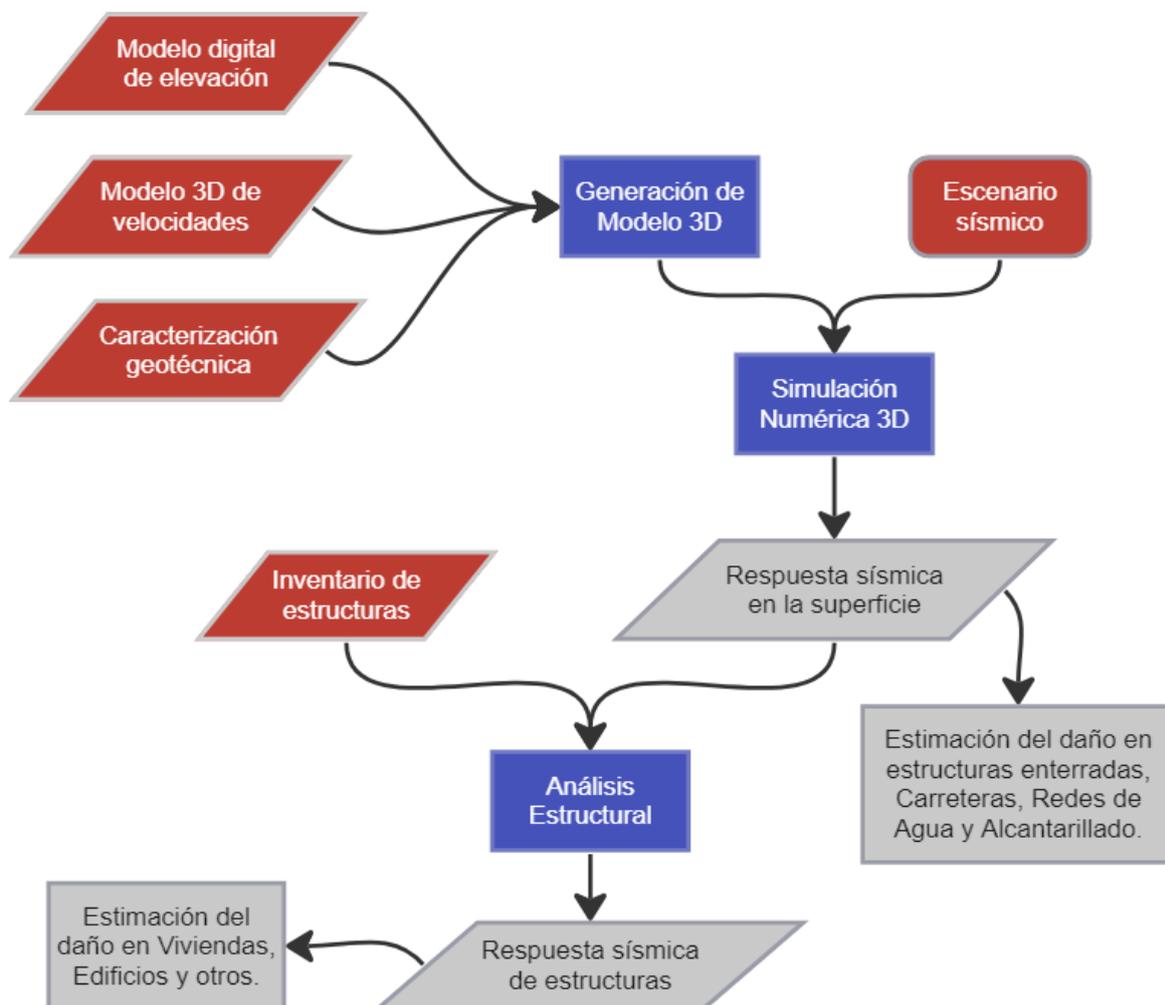


Figura 115 Metodología propuesta para la evaluación sísmica empleando simulaciones numéricas 3D.

### 6.1.1. Escenario sísmico

Considerando la información recopilada para la zona piloto en la sección 5.6, se cuenta con registros sísmicos para la aplicación de la metodología de la simulación numérica tridimensional de propagación de ondas sísmicas. Si bien es cierto los registros corresponden a sismos ligeros o moderados (M4.8-M6.0) que están relacionados a daños leves, estos sismos pueden ser utilizados para la validación de los resultados de las simulaciones numéricas (respuesta sísmica en la superficie y en las estructuras).

En ese sentido, los escenarios sísmicos propuestos para la aplicación y validación de la metodología son los siguientes:

- Sismo de Callao del 14 de abril de 2024 (M4.8).
- Sismo de Huaral del 15 de febrero de 2024 (M5.4).
- Sismo de Chilca del 12 de febrero de 2022 (M5.5). Solo se cuenta con los registros en la estación LIM009 de San Borja.
- Sismo de Lima del 7 de enero 2022 (M5.6). Solo se cuenta con los registros en la estación LIM009 de San Borja.
- Sismo de Mala del 22 de junio 2021 (M6.0). Solo se cuenta con los registros en la estación LIM009 de San Borja.

La Tabla 14 resume las intensidades expresadas en aceleraciones máximas de los escenarios sísmicos mencionados anteriormente. Notar que las aceleraciones en los registros de la estación AUDAS.00 es del mismo orden que el de la estación LIM009 pues ambos están instalados cerca a la sede de SENGICO en San Borja.

Tabla 14 Aceleraciones máximas registradas en estaciones en San Borja para sismos ligeros o moderados desde el año 2021.

	Aceleraciones máximas (cm/s <sup>2</sup> )								
	LIM009			AUDAS.00			AUDAS.01		
Sismo registrado	EO	NS	UP	EO	NS	UP	EO	NS	UP
Callao M4.8 14 de abril de 2024	-8.08	-7.74	-5.19	-8.12	-7.35	4.87	1.94	-3.45	2.59
Huaral M5.4 15 de febrero de 2024	18.0	15.8	-11.0	18.0	15.6	-11.2	-5.57	4.62	5.37
Chilca M5.5 12 de febrero de 2022	-38.1	34.3	-29.0	-	-	-	-	-	-
Lima 5.6 7 de enero de 2022	-50.8	-38.8	-25.1	-	-	-	-	-	-
Mala M6.0 22 de junio de 2021	-43.0	53.4	-32.5	-	-	-	-	-	-

### 6.1.2. Generación de Modelo 3D

Para la generación del modelo 3D es necesario contar con los siguientes datos de entrada:

- Modelo digital de elevación
- Modelo de velocidades sísmicas
- Caracterización geotécnica de las capas del suelo
- Inventario de estructuras
- Ubicación de puntos de observación sísmica

A partir de esta información se puede realizar una interpretación y procesamiento para introducir toda esta información a programas que generan el modelo 3D de elementos finitos. Estos programas utilizan algoritmos como la triangulación de Delaunay el cual fue explicado en la sección 3.1.2.

Como se mencionó anteriormente la zona de estudio tiene una extensión horizontal de 600 m x 600 m la cual está relacionada a un modelo 3D de elementos finitos que tiene grados de libertad en el orden de  $\sim 10^8$  DOF según lo estimado en la sección 3.5. En ese sentido, los programas que generen este tipo de modelos deben de tener la capacidad de trabajar con arreglos de gran dimensión y utilizar técnicas de computación de alto rendimiento pues el objetivo es generar un modelo 3D a escala urbana que represente fielmente la realidad.

### 6.1.3. Simulación Numérica 3D

La realización de simulaciones numéricas tridimensionales demanda una capacidad analítica dinámica, abordando diversos aspectos fundamentales para la precisión y relevancia de los resultados:

- **Fuerzas sísmicas:** Es esencial integrar modelos que representen con precisión la variabilidad temporal de las fuerzas, especialmente en escenarios sísmicos.
- **Propiedades y comportamiento de los materiales:** La incorporación de las propiedades de los materiales en la simulación es crítica para predecir con precisión la respuesta estructural. Estas propiedades, como la elasticidad, la plasticidad y la viscoelasticidad, se describen mediante modelos constitutivos que se han desarrollado y validado a través de experimentos y análisis teóricos.
- **Condiciones de borde absorbentes:** Para evitar reflexiones espurias y asegurar que el comportamiento del sistema sea representativo, es necesario implementar condiciones de borde absorbentes. Estas condiciones aseguran que las ondas generadas en los límites del dominio se disipen adecuadamente sin causar interferencias en el análisis.
- **Manejo de sistemas de gran dimensión y sistemas dispersos:** Para trabajar con sistemas de gran escala es crucial para simular estructuras complejas. Esto implica técnicas eficientes de almacenamiento y manipulación de datos dispersos, ya que las estructuras tridimensionales pueden generar sistemas de ecuaciones muy grandes y dispersos.
- **Eficiencia computacional:** Para resolver las ecuaciones en cada paso de tiempo, se requiere un enfoque computacionalmente eficiente. Métodos como la utilización de arquitecturas paralelas, algoritmos de integración temporal de alta precisión y técnicas de optimización específicas para la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales han sido objeto de investigación y aplicación en numerosos estudios científicos.
- **Almacenamiento y análisis de resultados:** Es importante que durante la simulación se permita guardar los resultados de interés en intervalos de tiempo específicos para su posterior análisis. Esto incluye datos como desplazamientos, tensiones, deformaciones, y cualquier otra variable relevante para la evaluación del comportamiento estructural.

Al considerar estas capacidades en la simulación numérica, se garantiza la capacidad de realizar análisis dinámicos precisos y detallados de sistemas tridimensionales en diversos escenarios y condiciones de carga.

#### 6.1.4. Respuesta sísmica

La simulación numérica de la propagación de ondas sísmicas permite capturar una variedad de parámetros fundamentales, incluyendo desplazamientos, velocidades, aceleraciones, deformaciones unitarias y esfuerzos. Esta representación detallada de la respuesta sísmica ofrece una visión integral del comportamiento dinámico de las estructuras ante eventos sísmicos.

Dado el volumen significativo de datos generados por la simulación, es crucial implementar estrategias efectivas de almacenamiento y visualización de resultados. Una práctica común es guardar la respuesta en intervalos específicos de tiempo y espacio para facilitar su análisis y comprensión. Por ejemplo, se pueden definir secciones críticas para mostrar los desplazamientos en áreas de especial interés, lo que permite una evaluación detallada del comportamiento estructural en puntos clave.

Para ilustrar cómo se puede optimizar la obtención de resultados, consideremos un escenario donde un análisis involucra 20,000 pasos de tiempo con un incremento de 0.005 segundos. En este caso, se recomienda imprimir los resultados cada 0.1 segundos. Esta frecuencia de impresión permite obtener una representación precisa de la evolución temporal de la respuesta sísmica sin sobrecargar el análisis con datos excesivos.

#### 6.2. Ventajas de la simulación numérica 3D

En el ámbito de la ingeniería sísmica, la evaluación del comportamiento de estructuras y suelos ante sismos es crucial para garantizar la seguridad de las ciudades y sus habitantes. En este contexto, la simulación numérica 3D se ha convertido en una herramienta invaluable para el análisis de la propagación de ondas sísmicas a escala urbana, ofreciendo una serie de ventajas sobre los métodos convencionales.

Los análisis convencionales, como el método de los elementos finitos 2D o las soluciones analíticas simplificadas, suelen presentar limitaciones significativas al abordar estudios a escala urbana. Estas limitaciones incluyen:

- **Evaluación simplificada:** La evaluación se realiza típicamente por manzana, lo que impide obtener una visión completa del comportamiento sísmico de toda la ciudad. La simulación numérica 3D, en cambio, permite evaluar el comportamiento de la ciudad en su conjunto, considerando las interacciones entre diferentes zonas y estructuras.
- **Precisión espacial limitada:** Los métodos convencionales suelen ofrecer una precisión espacial limitada, especialmente en áreas con topografía compleja o heterogeneidades geológicas.
- **Datos de respuesta limitados:** Los métodos convencionales generalmente proporcionan datos de respuesta limitados, como el máximo desplazamiento o la máxima aceleración del suelo, lo que dificulta la estimación precisa del daño potencial a las estructuras.

A continuación, se detallan las principales ventajas de la simulación numérica 3D en estudios de propagación de ondas sísmicas a escala urbana:

- **Mejor precisión espacial:** La simulación numérica 3D permite modelar con mayor precisión la geometría del terreno y las propiedades del suelo, lo que se traduce en resultados más confiables y precisos.

- Más datos de respuesta: La simulación numérica 3D, utilizando técnicas de HPC, permite obtener una amplia gama de datos de respuesta en toda el área de estudio, incluyendo esfuerzos, deformaciones y daños potenciales en las estructuras.
- Capacidad de simular modelos de geometría compleja y efectos de sitio: La simulación numérica 3D permite modelar geometrías complejas, como edificios irregulares o topografía accidentada, y considerar los efectos de sitio, como la amplificación de ondas sísmicas en zonas con suelos blandos o sedimentarios.
- Estimación de la interacción suelo-estructura: La simulación numérica 3D permite evaluar la interacción entre el suelo y las estructuras, lo que es crucial para determinar el comportamiento sísmico real de las edificaciones.
- Reducción de costos: La simulación numérica 3D puede evitar la necesidad de realizar costosos ensayos de campo y permite evaluar el comportamiento sísmico de un gran número de estructuras de forma más rápida y eficiente que los métodos convencionales.

En resumen, la simulación numérica 3D se ha convertido en una herramienta fundamental para el análisis de la propagación de ondas sísmicas a escala urbana, ofreciendo una serie de ventajas sobre los métodos convencionales. Su mayor precisión espacial, la capacidad de obtener más datos de respuesta, la posibilidad de simular modelos complejos y la estimación precisa de la interacción suelo-estructura la convierten en una herramienta invaluable para la mitigación del riesgo sísmico y la toma de decisiones informadas en el ámbito de la ingeniería sísmica.

---

## CONCLUSIONES

- En el presente estudio se ha revisado un total de 43 investigaciones relevantes a los objetivos del estudio, las cuales fueron sistematizada en temáticas relacionadas con la respuesta sísmica de edificios, comportamiento sísmico del suelo y el uso de computación de alto rendimiento en simulaciones numéricas de terremotos. La mayoría de estas investigaciones se concentran en los últimos siete años, lo que demuestra un interés creciente en este campo.
- La información recopilada proporciona una sólida base para comprender el estado actual de la simulación numérica 3D de la propagación de ondas sísmicas en zonas urbanas. Este tipo de simulaciones es de gran utilidad para el desarrollo de estrategias efectivas de evaluación y mitigación del riesgo sísmico en comunidades vulnerables.
- Existen diversos métodos y herramientas computacionales disponibles para realizar simulaciones numéricas de problemas de gran escala, incluyendo el método de elementos finitos, algoritmos para la generación de modelos, y técnicas para mejorar el rendimiento computacional y con ello reducir los costos monetarios que implican este tipo de simulaciones.
- El costo de realizar una simulación numérica a escala urbana depende de varios factores, como el tamaño del modelo, la complejidad del método computacional y la plataforma de computación a utilizar. Sin embargo, en general, el costo de la computación en la nube es menor que el costo de adquirir un servidor propio.
- Se realizó la recopilación e Identificación de ensayos de caracterización geofísica y/o geotécnica necesarios para la realización de simulaciones numéricas tridimensionales en determinadas zonas del país priorizando zonas de alto peligro sísmico y alta vulnerabilidad en viviendas, así como información topográfica y geológica, y requerimiento de instrumentación.
- Se realizó una descripción de disponibilidad de datos en el medio para la realización de simulaciones numéricas tridimensionales. Además, se explicó las ventajas de la evaluación del riesgo sísmico de edificaciones utilizando este tipo de simulaciones, en comparación con los análisis convencionales.
- Se propuso criterios y zonas para la aplicación piloto de las metodologías pre identificadas de simulación numérica tridimensional de propagación de ondas sísmicas en zonas urbanas en el país. Se elaboró diagramas de flujo para la aplicación de los mismos, así como la información, instrumentación y equipamientos necesarios para la aplicación en una zona determinada en el país.

---

## REFERENCIAS

- Abaqus*. (2023, julio 25). Dassault Systèmes. <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus>
- About ParaView*. (s/f). Recuperado el 3 de abril de 2024, de <https://www.paraview.org/about/>
- Alencastre, H. (2023). *Análisis de deflexiones y esfuerzos en tubería enterrada FEM*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Alva Hurtado, J. E. D., & Ortiz Salas, C. E. (2020). Updating the Occurrence of the Soil Liquefaction Phenomenon in Peru. *TECNIA*, 30(2), 6–17. <https://doi.org/10.21754/tecnica.v30i2.756>
- ANDINA. (2019). *Costa Verde: Derrumbe en acantilado interrumpe tránsito a altura playa Los Yuyos*. ANDINA, AGENCIA PERUANA DE NOTICIAS. <https://andina.pe/agencia/noticia-costa-verde-derrumbe-acantilado-interrumpe-transito-a-altura-playa-los-yuyos-video-778721.aspx>
- Aravena Pelizari, P., Geiß, C., Aguirre, P., Santa María, H., Merino Peña, Y., & Taubenböck, H. (2021). Automated building characterization for seismic risk assessment using street-level imagery and deep learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 180, 370–386. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.07.004>
- AUDAS. (2024). <https://audas.anddes.com/sensor/>
- Balay, S., Abhyankar, S., Adams, M., Benson, S., Brown, J., Brune, P., Buschelman, K., Constantinescu, E., Dalcin, L., Dener, A., Eijkhout, V., Faibussowitsch, J., Gropp, W., Hapla, V., Isaac, T., Jolivet, P., Karpeev, D., Kaushik, D., Knepley, M., ... Zhang, J. (2023). *PETSc/TAO Users Manual (Rev. 3.20)* (ANL--21/39 Rev. 3-20, 2205494, 185712; p. ANL--21/39 Rev. 3-20, 2205494, 185712). <https://doi.org/10.2172/2205494>
- Bathe, K. (1996). *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice Hall.
- Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID*. (2024). <https://www.cismid.uni.edu.pe/ceois/red/>

- 
- Chivers, I., & Sleightholme, J. (2015). *Introduction to Programming with Fortran: With Coverage of Fortran 90, 95, 2003, 2008 and 77*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17701-4>
- CISMID. (2022, diciembre 21). SATREPS: CISMID instaló 4 sensores de aceleración en el SENCICO. *CISMID*. <https://www.cismid.uni.edu.pe/cismid-instalo-4-sensores-de-aceleracion-en-el-sencico/>
- Falcone, G., Boldini, D., & Amorosi, A. (2018). Site response analysis of an urban area: A multi-dimensional and non-linear approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 109, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.02.026>
- Flores Terreros, E. N., Díaz, M., & Zavala, C. (2019). Development of fragility function for typologies of confined masonry dwelling in Metropolitan Lima and Callao cities. *TECNIA*, 29(2). <https://doi.org/10.21754/tecnica.v29i2.717>
- García, J., & Vásquez, Y. (2020). *Modelamiento en elementos finitos de tunnel liner para cruce de sistema de agua potable y alcantarillado—Trebol de Javier Prado*. Universidad Ricardo Palma.
- Geuzaine, C., & Remacle, J. (2009). Gmsh: A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*.
- Hori, M., Ichimura, T., Wijerathne, L., Ohtani, H., Chen, J., Fujita, K., & Motoyama, H. (2018). Application of High Performance Computing to Earthquake Hazard and Disaster Estimation in Urban Area. *Frontiers in Built Environment*, 4, 1. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00001>
- Ichimura, T., Agata, R., Hori, T., Hirahara, K., Hashimoto, C., Hori, M., & Fukahata, Y. (2016). An elastic/viscoelastic finite element analysis method for crustal deformation using a 3-D island-scale high-fidelity model. *Geophysical Journal International*, 206(1), 114–129. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw123>

- Ichimura, T., Fujita, K., Hori, M., Sakanoue, T., & Hamanaka, R. (2014). Three-Dimensional Nonlinear Seismic Ground Response Analysis of Local Site Effects for Estimating Seismic Behavior of Buried Pipelines. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 136(4), 041702. <https://doi.org/10.1115/1.4026208>
- Ichimura, T., Fujita, K., Koyama, K., Kusakabe, R., Kikuchi, Y., Hori, T., Hori, M., Maddeggedara, L., Ohi, N., Nishiki, T., Inoue, H., Minami, K., Nishizawa, S., Tsuji, M., & Ueda, N. (2022). 152K-computer-node parallel scalable implicit solver for dynamic nonlinear earthquake simulation. *International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region*, 18–29. <https://doi.org/10.1145/3492805.3492814>
- Ichimura, T., Fujita, K., Yamaguchi, T., Naruse, A., Wells, J. C., Schulthess, T. C., Straatsma, T. P., Zimmer, C. J., Martinasso, M., Nakajima, K., Hori, M., & Maddeggedara, L. (2018). A Fast Scalable Implicit Solver for Nonlinear Time-Evolution Earthquake City Problem on Low-Ordered Unstructured Finite Elements with Artificial Intelligence and Transprecision Computing. *SC18: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, 627–637. <https://doi.org/10.1109/SC.2018.00052>
- Iguavil, L., & Pocco, G. (2023). *Propuesta de mejoramiento de suelo a fin de mitigar los efectos de las ondas sísmicas en un estrato intermedio de suelo blando mediante un análisis lineal equivalente para asegurar la cimentación de un reservorio de agua en el departamento de Cajamarca*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- INEI. (2018). *Provincia de Lima, Resultados Definitivos, Tomo [CENSO]*. Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).
- Kochan, S. G. (2015). *Programming in C* (Fourth Edition). Addison-Wesley.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- Kusakabe, R., Fujita, K., Ichimura, T., Hori, M., & Wijerathne, L. (2019). A Fast 3D Finite-Element Solver for Large-Scale Seismic Soil Liquefaction Analysis. En J. M. F. Rodrigues, P. J. S. Cardoso, J. Monteiro, R. Lam, V. V. Krzhizhanovskaya, M. H. Lees,

- 
- J. J. Dongarra, & P. M. A. Sloot (Eds.), *Computational Science – ICCS 2019* (Vol. 11537, pp. 349–362). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22741-8\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22741-8_25)
- Kusakabe, R., Fujita, K., Ichimura, T., Yamaguchi, T., Hori, M., & Wijerathne, L. (2021). Development of regional simulation of seismic ground-motion and induced liquefaction enhanced by GPU computing. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(1), 197–213. <https://doi.org/10.1002/eqe.3369>
- Liu, S., Li, X., Wang, W., & Liu, Y. (2014). A mixed-grid finite element method with PML absorbing boundary conditions for seismic wave modelling. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11(5), 055009. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/11/5/055009>
- Lu, X., Tian, Y., Wang, G., & Huang, D. (2018). A numerical coupling scheme for nonlinear time history analysis of buildings on a regional scale considering site-city interaction effects. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(13), 2708–2725. <https://doi.org/10.1002/eqe.3108>
- Lutz, M. (2017). *Learning Python* (Fifth edition). O'Reilly.
- Matsuzaki, S., Pulido, N., Maruyama, Y., Estrada, M., Zavala, C., Yamazaki, F., Graduate School of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Ibaraki, Japan, & Japan-Peru Center for Earthquake Engineering Research and Disaster Mitigation, National University of Engineering, Lima, Peru. (2014). Evaluation of Seismic Vulnerability of Buildings Based on Damage Survey Data from the 2007 Pisco, Peru Earthquake. *Journal of Disaster Research*, 9(6), 1050–1058. <https://doi.org/10.20965/jdr.2014.p1050>
- Mazzieri, I., Stupazzini, M., Guidotti, R., & Smerzini, C. (2013). SPEED: SPectral Elements in Elastodynamics with Discontinuous Galerkin: a non-conforming approach for 3D multi-

- scale problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 95(12), 991–1010. <https://doi.org/10.1002/nme.4532>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú. (2018). *Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente del RNE*.
- Mulatillo, J. (2020). *Peligro inminente por derrumbe en los acantilados de la Costa Verde—Lima*. Centro de Operaciones de Emergencia Nacional - COEN.
- Murguytio, A., & Tanaka, E. (2014). *Mapas de peligros, vulnerabilidad y riesgos, plan de usos del suelo ante desastres, proyectos y medidas de mitigación de la Costa Verde*. Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI.
- Ogawa, Y., Zhao, C., Oki, T., Chen, S., & Sekimoto, Y. (2023). Deep Learning Approach for Classifying the Built Year and Structure of Individual Buildings by Automatically Linking Street View Images and GIS Building Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, 1740–1755. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3237509>
- Otero, D. (2021). *Comportamiento sísmico de edificaciones de adobe de un nivel influenciados por la relación de aspecto*.
- Palacios, J., Tarrillo, A., Fujita, K., Diaz, M., Zavala, C., & Inocente, I. (2024). *SIMULATING EARTHQUAKE-INDUCED WAVE PROPAGATION WITH GPU- ACCELERATED COMPUTING*.
- Panzer, F., Alber, J., Imperatori, W., Bergamo, P., & Fäh, D. (2022). Reconstructing a 3D model from geophysical data for local amplification modelling: The study case of the upper Rhone valley, Switzerland. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 155, 107163. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107163>
- PLAXIS 3D: Software de ingeniería geotécnica* | Bentley Systems. (2022, mayo 16). <https://es-la.bentley.com/software/plaxis-3d/>
- Preschern, C. (2022). *Fluent C*. O'Reilly Media, Inc.

---

Pretell, R., & Aguilar, Z. (2016). *DYNAMIC ASSESSMENT OF THE COSTA VERDE CLIFFS IN LIMA*.

*PYPL PopularitY of Programming Language index*. (s/f). Recuperado el 2 de abril de 2024, de <https://pypl.github.io/PYPL.html>

Riaño, A. C., Reyes, J. C., Yamín, L. E., Bielak, J., Taborda, R., & Restrepo, D. (2021). Integration of 3D large-scale earthquake simulations into the assessment of the seismic risk of Bogota, Colombia. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(1), 155–176. <https://doi.org/10.1002/eqe.3373>

Roten, D., Cui, Y., Olsen, K. B., Day, S. M., Withers, K., Savran, W. H., Wang, P., & Mu, D. (2016). High-Frequency Nonlinear Earthquake Simulations on Petascale Heterogeneous Supercomputers. *SC16: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, 957–968. <https://doi.org/10.1109/SC.2016.81>

Saouma, V., Miura, F., Lebon, G., & Yagome, Y. (2011). A simplified 3D model for soil-structure interaction with radiation damping and free field input. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(5), 1387–1402. <https://doi.org/10.1007/s10518-011-9261-7>

*SENGICO - Ensayos Geofísicos*. (2020). <https://perfilessuelos.sengico.gob.pe/CatalogoWeb>

Shibata, A. (2010). *Dynamic Analysis of Earthquake Resistant Structures*. Tohoku University CO-OP.

*Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres—SIGRID*. (2019). <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/mapa?xmin=-75.73297505&ymin=-14.08180588&xmax=-75.71404302&ymin=-14.0446212>

Smerzini, C., Pitilakis, K., & Hashemi, K. (2017). Evaluation of earthquake ground motion and site effects in the Thessaloniki urban area by 3D finite-fault numerical simulations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(3), 787–812. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9977-5>

- 
- Smith, I., Griffiths, D., & Margetts, L. (2014). *Programming the Finite Element Method*. Wiley.
- Tardeo, C., & Zanabria, E. (2016). *Análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos en la zona de Huayllapampa del distrito de Cuenca—Huancavelica*. Universidad Nacional de Huancavelica.
- Tejada, C. (2021). *Plan de prevención y reducción de riesgo de desastres ante sismo del distrito de San Borja*. Municipalidad Distrital de San Borja.
- Trigos, D. (2018). *Análisis Matricial de Estructuras por el método de elementos finitos y su aplicación a tuneles*. Universidad José Carlos Mariátegui.
- Vergaray, L. (2022). *Análisis sísmico de estructuras enterradas*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Villegas, J. C., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J., & Nocquet, J.-M. (2016). Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7371–7394. <https://doi.org/10.1002/2016JB013080>
- Wankhede, P., Talati, M., & Chinchamalature, R. (2020). COMPARATIVE STUDY OF CLOUD PLATFORMS -MICROSOFT AZURE, GOOGLE CLOUD PLATFORM AND AMAZON EC2. *Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, 05(02), 60–64. <https://doi.org/10.46565/jreas.2020.v05i02.004>
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The finite element method for solid and structural mechanics* (6th ed). Elsevier Butterworth-Heinemann.

## ANEXOS

### A. ENSAYOS DE MICROTREMORES DISPONIBLES EN LA ZONA PILOTO – SAN BORJA

El valor del periodo para esta ubicación es de  $t = 0.177$  s.

#### A.1. M15-1

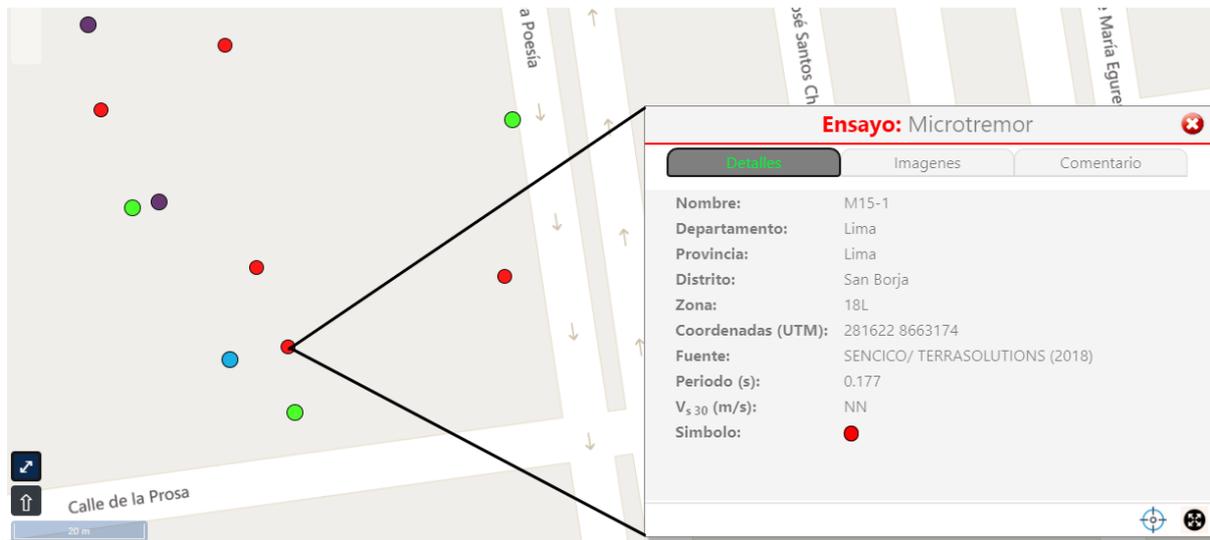


Figura 116 Ubicación del ensayo M15-1. Fuente: SENGICO - Ensayos Geofísicos (2020)

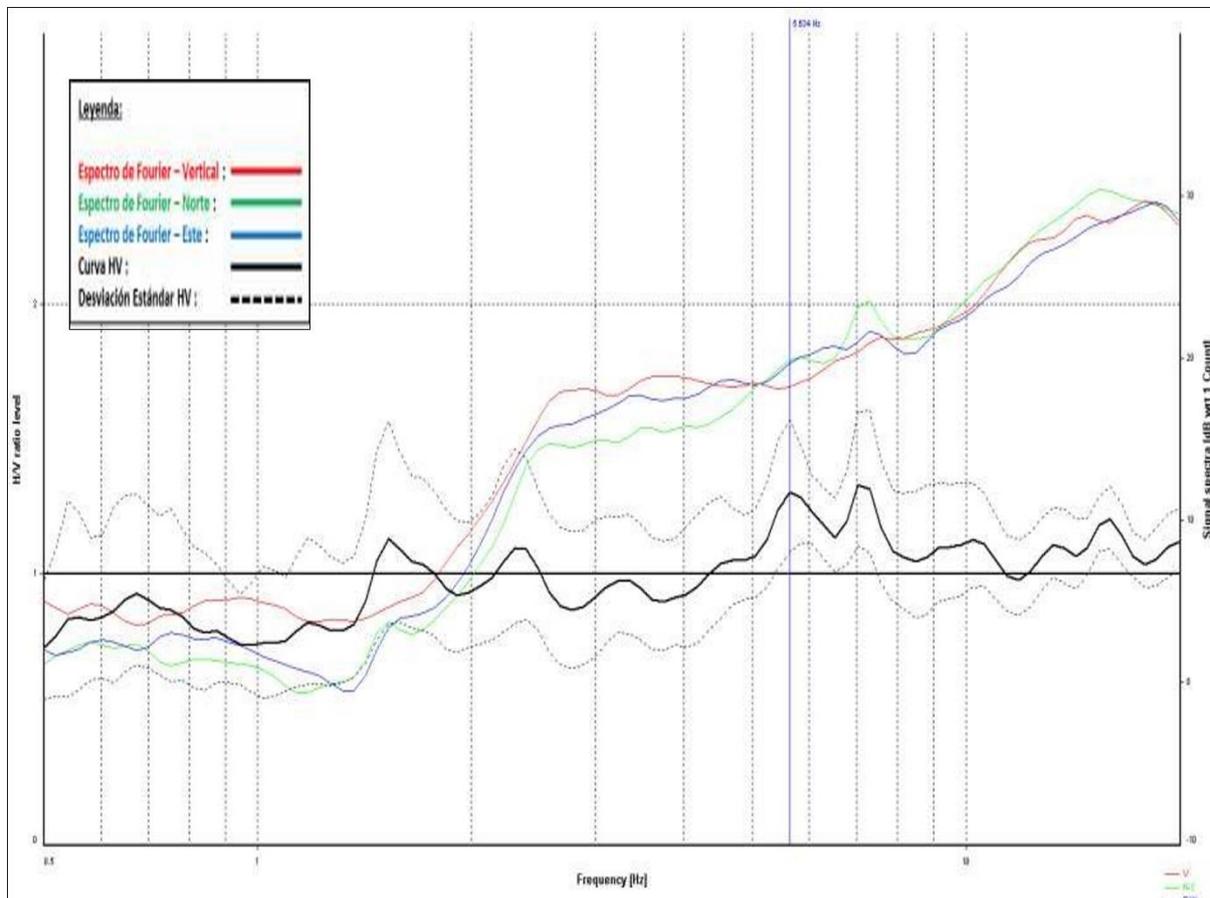


Figura 117 Espectro de frecuencias obtenido del ensayo M15-1. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

## A.2. M15-2

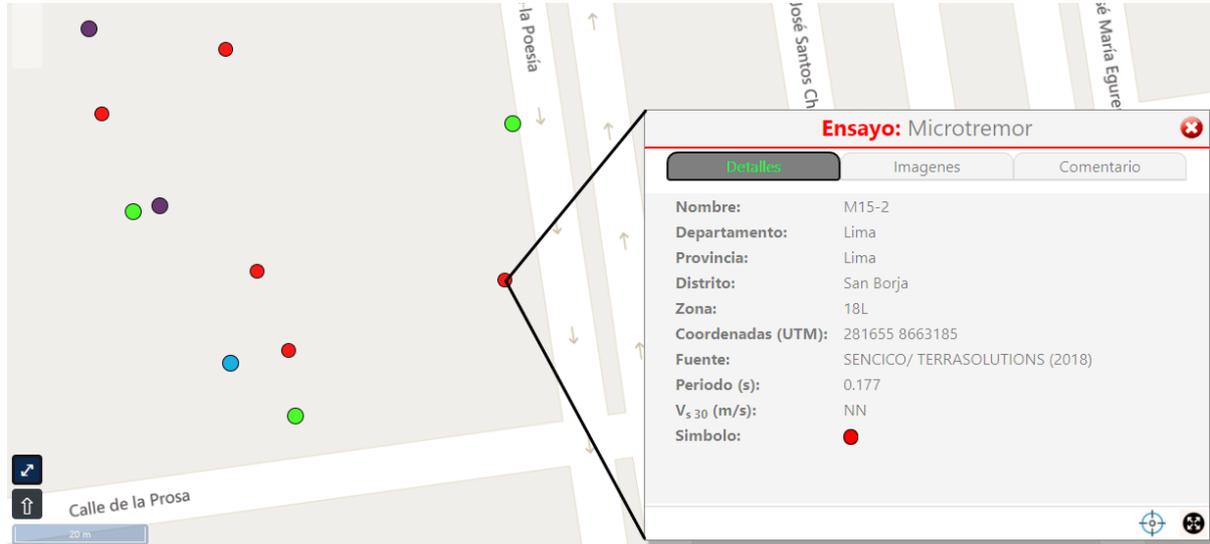


Figura 118 Ubicación del ensayo M15-2. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

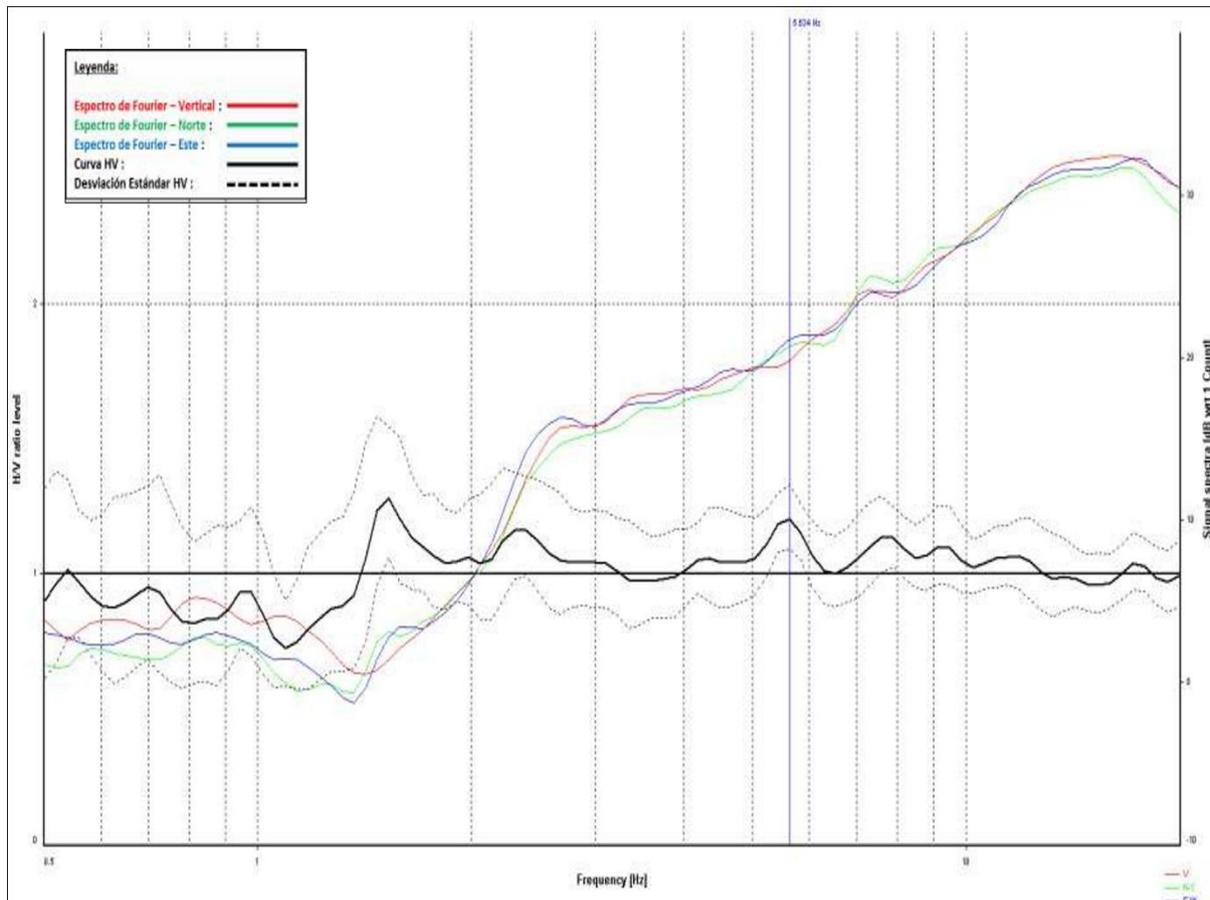


Figura 119 Espectro de frecuencias obtenido del ensayo M15-2. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

### A.3. M15-3

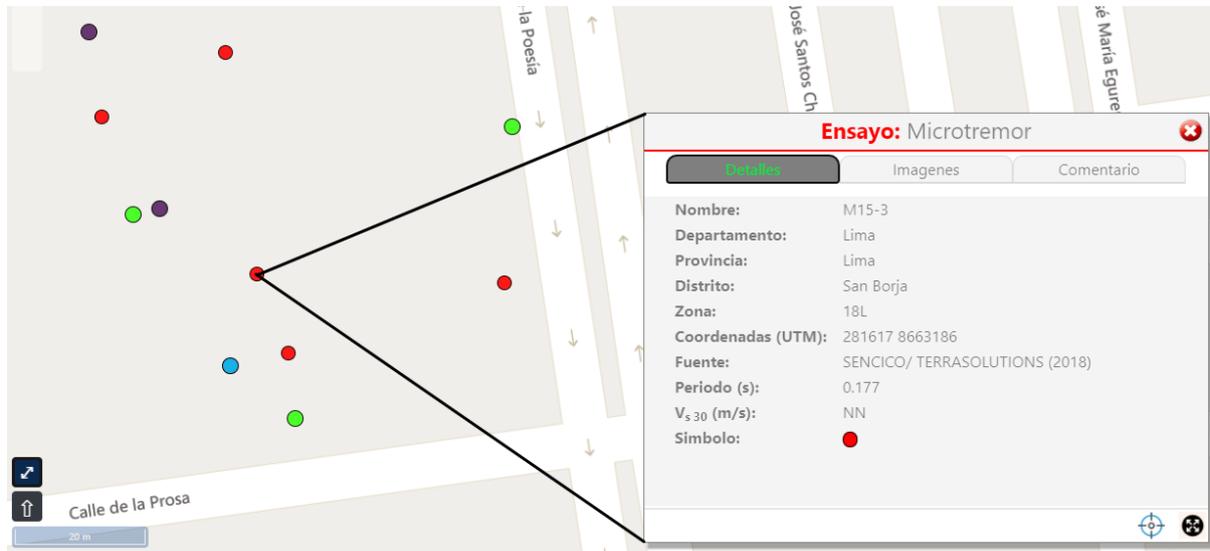


Figura 120 Ubicación del ensayo M15-3. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

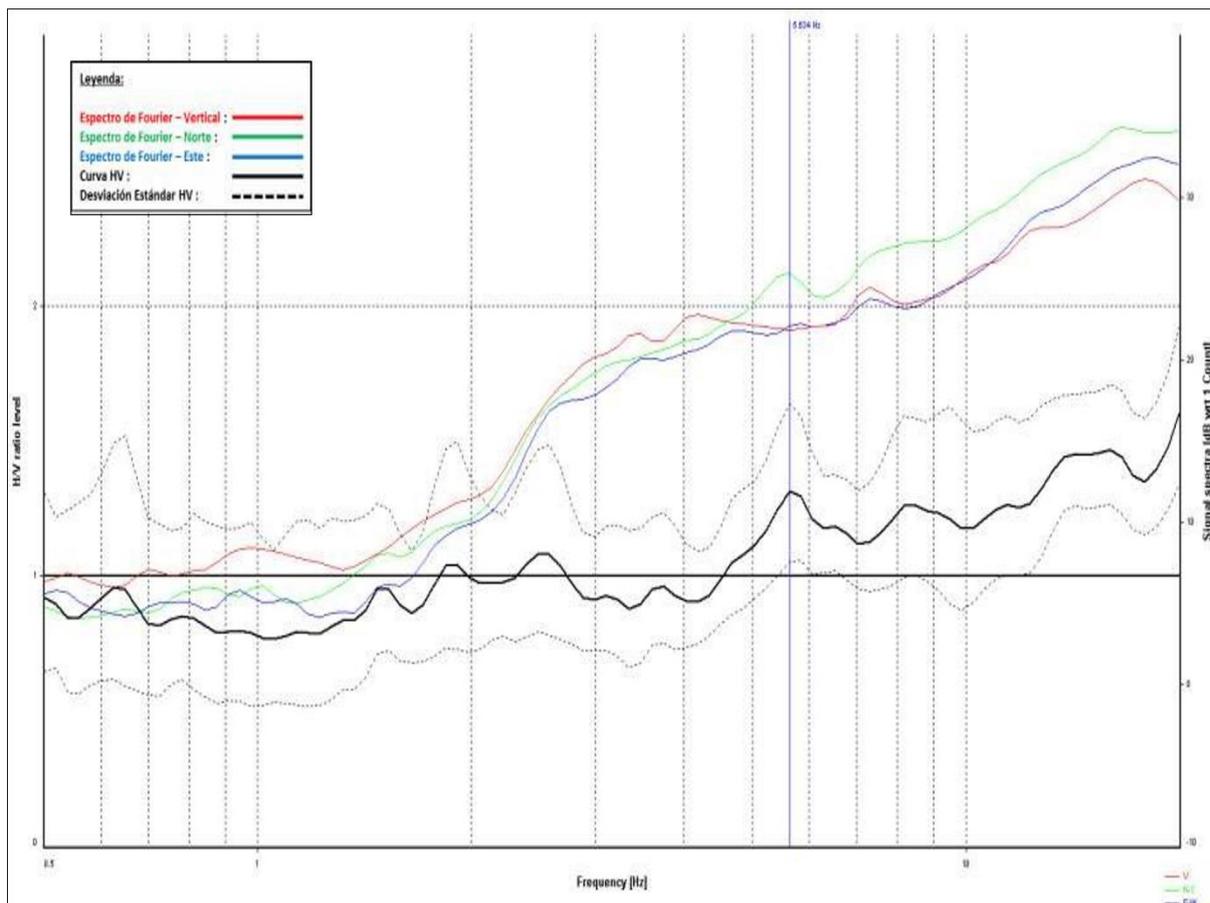


Figura 121 Espectro de frecuencias obtenido del ensayo M15-3. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

### A.4. M15-4

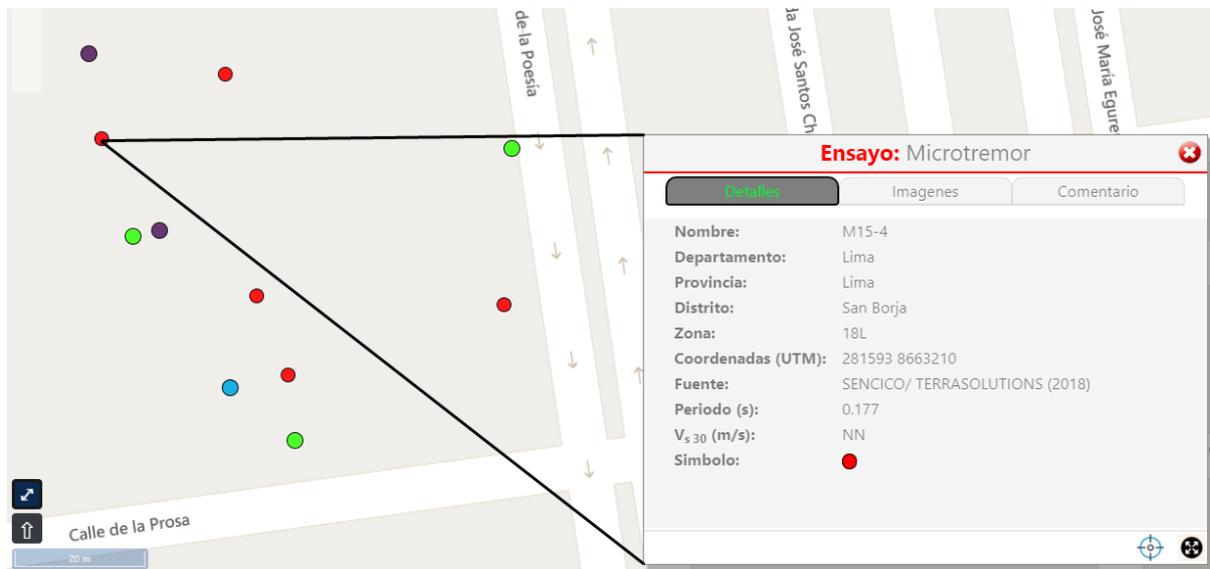


Figura 122 Ubicación del ensayo M15-4. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

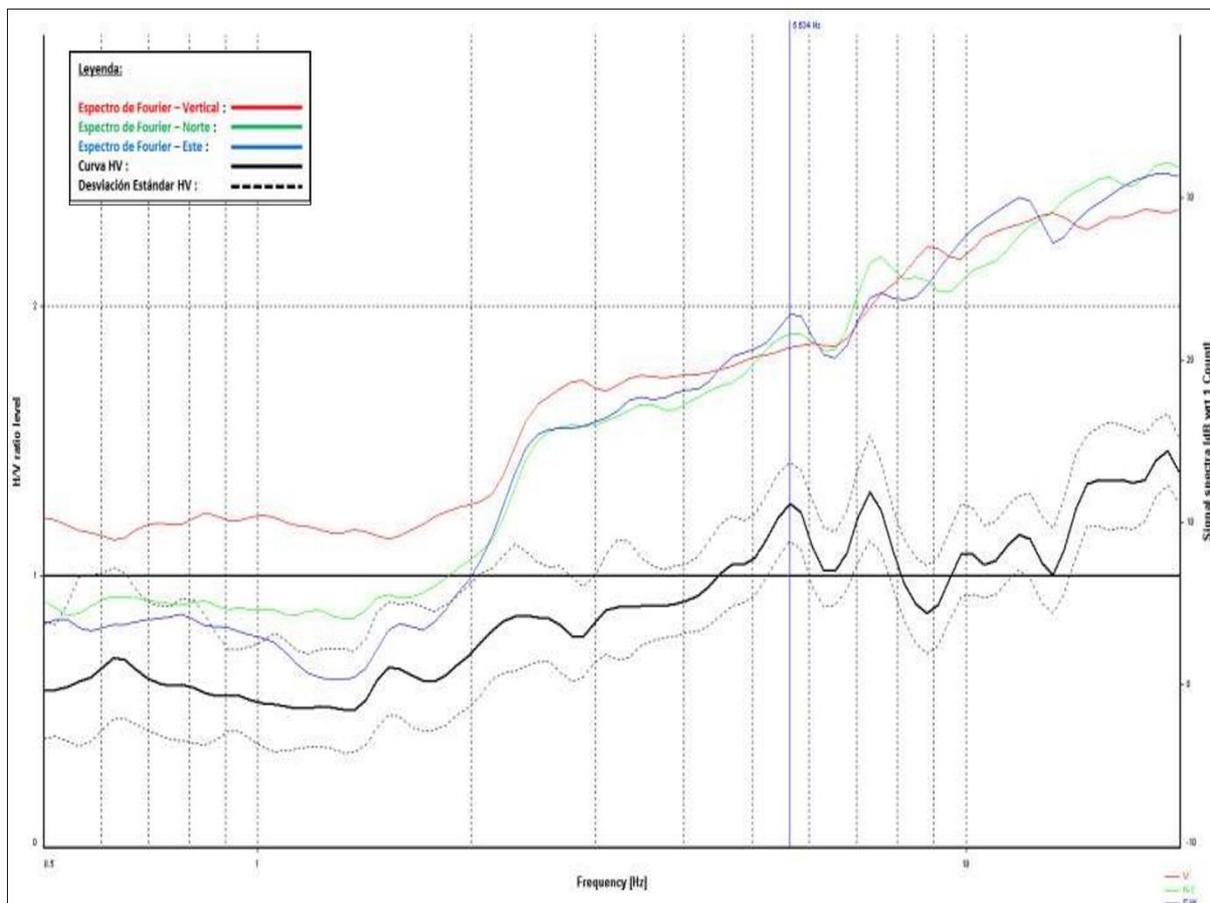


Figura 123 Espectro de frecuencias obtenido del ensayo M15-4. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

#### A.5. M15-5

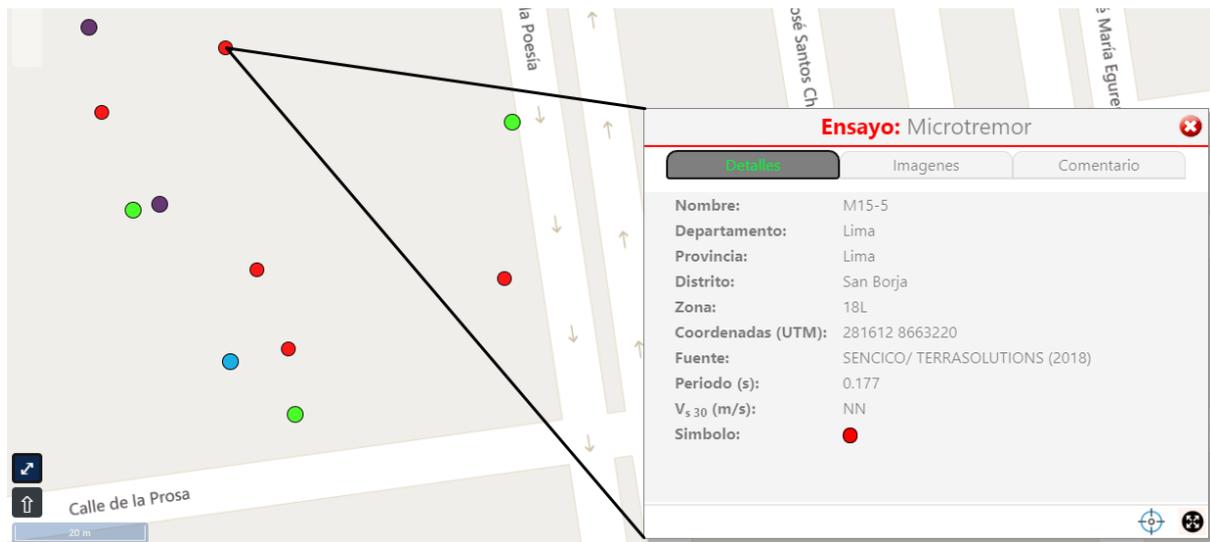


Figura 124 Ubicación del ensayo M15-5. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)

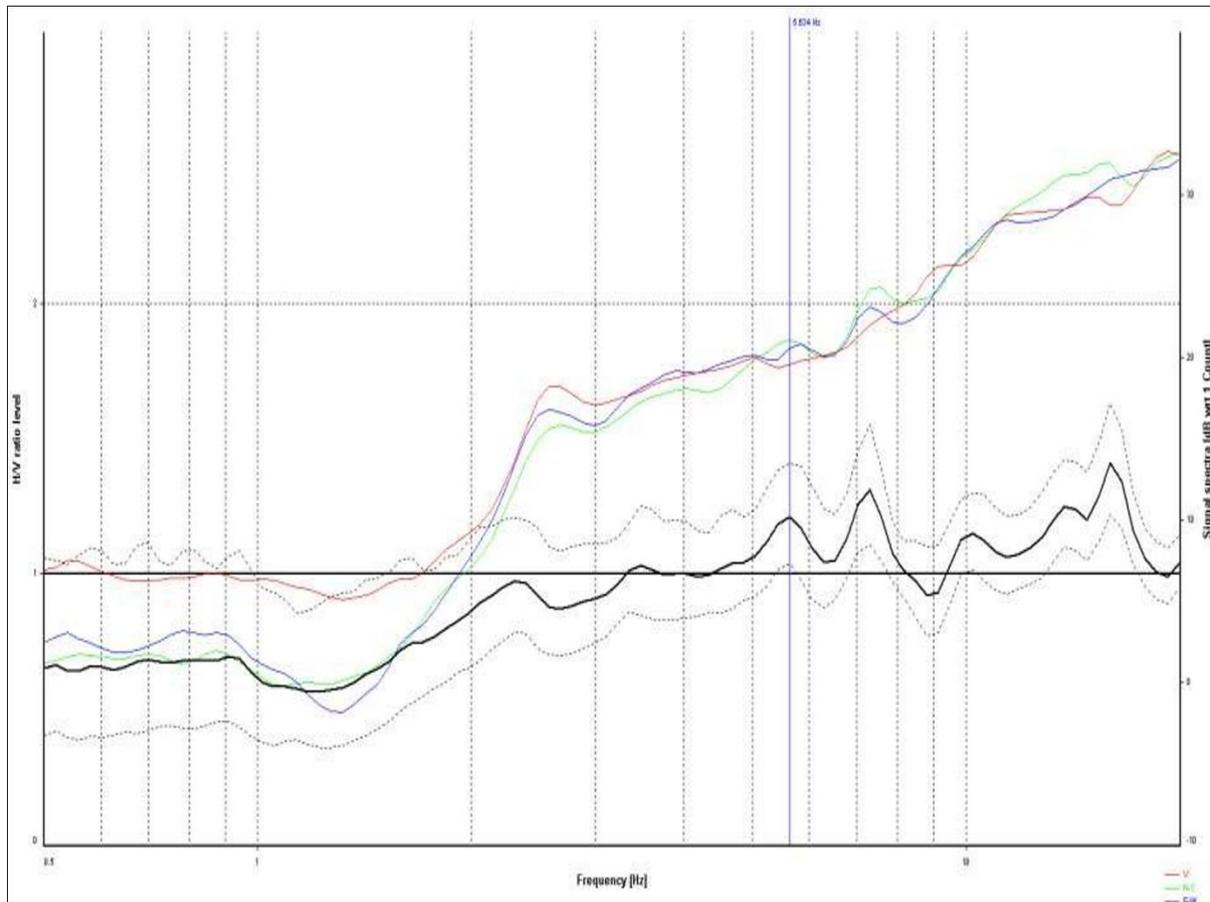


Figura 125 Espectro de frecuencias obtenido del ensayo M15-5. Fuente: SENCICO - Ensayos Geofísicos (2020)