

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LOS DISTRITOS DE LA
PERLA Y SAN MIGUEL**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

**GERSON DARIO CARRASCO DÍAZ
ID: 0009-0002-8542-4277**

ASESORA

**Dra. DIANA LUCÍA CALDERÓN CAHUANA
ID: 0000-0001-6007-9177**

LIMA – PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados
**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Carrasco Díaz, Gerson Dario
gcarascod@uni.pe
+51 955959528

DEDICATORIA

A mi madre Giovanna Díaz y a mi padre Dario Carrasco

Por ser los principales guías de mi formación personal y académica.

Y por la confianza que me han brindado en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Giovanna Díaz y Dario Carrasco por ser los principales guías durante mi formación personal y escolar. Ellos fueron la base para obtener muchos logros a lo largo de toda mi vida mediante la disciplina y los valores que ellos inculcaron a mis hermanos y a mi persona. También a mis abuelas Ofelia y Martha por siempre haberme dado una mano en los momentos difíciles de mi vida y por los sabios consejos que me han brindado.

Agradezco enormemente a mi asesora de tesis, la Dra Diana Calderón y a mi asesor el Dr. Carlos Gonzales por haber brindado su valioso tiempo y su basto conocimiento para la elaboración de la presente tesis. Además, también a mis compañeros y grandes amigos del CISMID-FIC-UNI, Angela Valdez, Brandon Pastor, Gisela Pumalaza, Cinthia Calderón, Fernando García, Bryan Long, Ángel Matos y Elder Valentín por su gran apoyo incondicional tanto en el aspecto académico como el aspecto motivacional.

Expreso mi agradecimiento al Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmica y Mitigación de Desastres de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (CISMID-FIC-UNI) donde desarrollé la presente tesis, específicamente en el Departamento de Planeamiento y Mitigación de Desastres, donde se utilizaron para la obtención de datos de microtremores el equipo GEODAS y TOKYO SOKUSHIN y para los ensayos MASW y Refracción sísmica el equipo OYO.

Agradezco el apoyo incondicional por parte del MSc. Fernando Lázares, la Ing Silvia Alarcón y del Dr. Zenón Aguilar, excelentes profesionales que me permitieron enriquecer mis conocimientos mediante la participación en proyectos de investigación.

También reconocer el apoyo brindado por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) a través de la Dra. Sandra Santa Cruz Hidalgo y el Ing. Carlos Yaya Miranda por el acceso a los registros de aceleración obtenidos en la estación acelerográfica de la PUCP y utilizados en la presente investigación.

Este trabajo fue financiado por el CONCYTEC, PROCIENCIA y SENCICO en el marco de la convocatoria Proyecto de Investigación Aplicada en Construcción y Saneamiento 2018-01 [contrato No 118-2018-FONDECYT].

ÍNDICE

Resumen	5
Abstract.....	8
Prólogo	11
Lista de tablas.....	12
Lista de figuras	13
Lista de símbolos y siglas	17
Capítulo I. Introducción.....	19
1.1 Generalidades	19
1.1.1 Ubicación.....	19
1.1.2 Desarrollo urbano	20
1.2 Descripción del problema de investigación	20
1.3 Objetivos del estudio.....	22
1.4 Antecedentes investigativos.....	23
1.5 Metodología del trabajo	25
1.6 Organización de la tesis.....	26
Capítulo II. Marcos Teórico y Conceptual	29
2.1 Ondas sísmicas	29
2.2 Análisis de peligro sísmico.....	31
2.2.1 Caracterización de las fuentes sismogénicas.....	32
2.2.2 Leyes de atenuación.....	34
2.2.3 Incertidumbre en el tiempo.....	34
2.2.4 Cálculo del peligro sísmico probabilístico.....	34
2.3 Propiedades dinámicas del suelo.....	36
2.3.1 Velocidad de onda de corte	36
2.3.2 Periodo fundamental del suelo.....	38
2.3.3 Módulo de corte y razón de amortiguamiento	40

2.4 Prospección geofísica para la determinación de los propiedades dinámicas del suelo	44
2.4.1 Ensayo de refracción sísmica	44
2.4.2 Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)	45
2.4.3 Medición puntual de microtremores	47
2.4.4 Arreglos de microtremores	49
2.5 Respuesta unidimensional del suelo	52
2.5.1 Análisis lineal equivalente	58
2.5.2 Análisis no lineal	59
2.5.3 Modelos no lineales del suelo	59
Capítulo III. Características geológicas y geotécnicas	63
3.1 Características geológicas	63
3.1.1 Geomorfología	63
3.1.2 Litoestratigrafía	64
3.2 Características geotécnicas	66
3.2.1 Datos geotécnicos recopilados	66
3.2.2 Tipos de suelos	70
Capítulo IV. Análisis de peligro sísmico	72
4.1 Introducción	72
4.2 Evaluación de peligro sísmico	72
4.2.1 Zonificación tectónica del Perú	72
4.2.2 Sismicidad histórica	73
4.2.3 Sismicidad instrumental	74
4.2.4 Geometría de las fuentes sismogénicas	74
4.2.5 Parámetros sismológicos locales	74
4.2.6 Leyes de atenuación	75
4.2.7 Marco sismotectónico local	76
4.3 Espectros de peligro uniforme	77

Capítulo V. Características dinámicas del suelo	79
5.1 Introducción	79
5.2 Información recopilada.....	79
5.2.1 Razones espectrales H/V recopiladas.....	80
5.2.2 Perfiles sísmicos Vs superficiales recopilados	82
5.2.3 Perfiles sísmicos Vs profundos recopilados	83
5.2.4 Curva de degradación.....	84
5.3 Mediciones en campo	86
5.3.1 Medición puntual de microtremores	86
5.3.2 Ensayo de Refracción Sísmica y MASW.....	87
5.3.3 Arreglos de microtremores.....	88
5.4 Procesamiento en gabinete	90
5.4.1 Medición puntual de microtremores	90
5.4.2 Ensayo de Refracción Sísmica	93
5.4.3 Ensayo MASW.....	93
5.4.4 Arreglos de microtremores.....	95
Capítulo VI. Análisis de respuesta de sitio	97
6.1 Modelamiento de los depósitos de suelo	97
6.2 Escenarios sísmicos para el análisis unidimensional	101
6.3 Resultados del análisis	103
6.4 Espectros de respuesta de sismos registrados	106
Capítulo VII. Microzonificación Sísmica.....	116
7.1 Mapa de peligros naturales.....	117
7.2 Mapa de Microzonificación Geotécnica.....	119
7.3 Mapa de isoperíodos.....	121
7.4 Mapas de vs30	122
7.5 Mapa de Microzonificación Sísmica.....	123
Conclusiones	125

Recomendaciones	128
Referencias bibliográficas	130
Anexos	139

RESUMEN

La ciudad de Lima ha sido sometida constantemente a terremotos a lo largo de su historia. El evento sísmico más destructivo registrado ocurrió el 28 de octubre de 1746. Este sismo vino acompañado de un tsunami que inundó y destruyó gran parte del Callao. Además, causó la pérdida de cientos de personas y el colapso de casi la totalidad de viviendas de la ciudad.

Pulido et al. (2015), como parte de las actividades del proyecto SATREPS desarrollado en el Perú del año 2010 al 2015, bajo la coordinación de la contraparte peruana por el CISMID-FIC-UNI, concluye que es probable la ocurrencia de un escenario sísmico de magnitud Mw 8.9 en la región central del Perú, con área de ruptura de fuente de aproximadamente 500 km de largo.

Villegas et al (2016) menciona que la zona central del Perú, según su modelo de acoplamiento sísmico, puede albergar un gran terremoto en las próximas décadas un gran terremoto que podría alcanzar una magnitud Mw 8.8.

El escenario que podría producir el terremoto esperado para la zona central del Perú tendría características similares al terremoto ocurrido en el año 1746. Entonces, urge la necesidad de realizar estudios que permitan conocer las características mecánicas y dinámicas del suelo. Estos estudios se realizan con la finalidad de entender la respuesta sísmica y elaborar diseños sismorresistentes de edificaciones y mitigar los daños que podría producir estos eventos naturales.

Los distritos de La Perla y San Miguel están ubicados en Lima Metropolitana y pertenecen al cono de deyección del río Rímac. Sin embargo, los trabajos del CISMID-FIC-UNI realizado en los años 2015 y 2016 señalan una variación en los materiales superficiales a pesar de ser distritos contiguos.

La microzonificación sísmica es un estudio dirigido a identificar zonas de suelos que puedan presentar comportamiento similar durante la ocurrencia de un sismo severo; determinadas las zonas pueden darse recomendaciones precisas para el diseño y construcción de edificaciones sismo resistentes. La determinación de estas zonas se realiza teniendo en cuenta las condiciones topográficas, los depósitos geológicos y los materiales que conforman los suelos (tipos, espesores y consistencia de los suelos expresados mediante sus características mecánicas y dinámicas). La Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E.030 define lo que es el estudio de Microzonificación Sísmica e indica que será requisito la ejecución

de este estudio para la determinación de áreas de expansión de ciudades, construcción de complejos industriales o similares y reconstrucción de áreas urbanas destruidas por sismos y fenómenos asociados. Por lo tanto el Mapa de Microzonificación Sísmica es una herramienta muy útil para los planificadores urbanos ya que les proporcionará información técnica que les permitirá tomar decisiones para orientar el crecimiento y desarrollo urbano de manera sostenible en una ciudad, disminuyendo su riesgo ante la ocurrencia de un sismo severo. (CISMID-FIC-UNI, 2015)

Esta tesis presenta una actualización de los mapas de Microzonificación Geotécnica y Sísmica de los distritos de La Perla y San Miguel en donde se establecen áreas de similares características geológicas, geotécnicas y dinámicas. Además, se pudo estimar los cambios en la respuesta sísmica del suelo teniendo en cuenta la variación de materiales superficiales encontrados en ambos distritos.

La información recopilada en diversos estudios señala que los distritos de La Perla y San Miguel presentan depósitos de suelos compuesto por materiales acarreados por el río Rímac. Además, se ha encontrado que en el distrito de La Perla predomina el material arenoso arcilloso en la superficie, y subyacente a esta se encuentra la grava aluvial de gran espesor. Mientras que, en el distrito de San Miguel, el material arenoso arcilloso va perdiendo potencia en la dirección este.

El estudio de peligro sísmico realizado en este trabajo está basado principalmente en el modelo de fuentes sismogénicas establecidas por Roncal (2017) para todo el Perú.

Los estudios geofísicos realizados en el área de estudio señalan que presenta valores de períodos cortos menores a 0.30 segundos. Sin embargo, los trabajos de Quispe et al. (2021) e IGP (2021) indican la existencia de períodos largos alrededor de 1 segundo. Este valor de periodo podría estar relacionado a depósitos de suelo profundo de gran espesor. Por esta razón, en este trabajo se tomó en cuenta los períodos cortos como períodos largos.

Se realizó el análisis de respuesta del suelo a partir de escenarios sísmicos en cinco perfiles de Vs entre recopilados y ejecutados. Este análisis dio como resultado amplificaciones en el espectro de respuesta en períodos cortos entre 0.20 y 0.30 segundos en un perfil muy rígido. Este resultado se dio en la zona este

del área de estudio, donde se encuentran depósitos de grava. Además, en esta zona se presenta un decaimiento en los períodos mayores a este. Por otro lado, los perfiles ubicados en la zona oeste presentan amplificaciones relativamente más altas para períodos estructurales mayores a 1 segundos, esto puede deberse a la presencia de material flexible a grandes profundidades.

El mapa de Microzonificación Sísmica del distrito de La Perla y San Miguel se obtuvo a partir de los mapas de Microzonificación Geotécnica, Isoperíodos y Vs30. Esto con la finalidad de que se obtenga un mapa que integre a las características geotécnicas y dinámicas, y que represente de manera más adecuada los depósitos de suelo. Se definieron 5 zonas: La zona I presenta materiales de suelo con Vs30 entre 450 y 700 m/s (suelos S1 y S2), con períodos cortos menores a 0.20 segundos y con capas superficiales de material arenoso arcilloso con espesores menores a 3 m. La zona II A con Vs30 entre 350 y 450 m/s (suelo S2) y con una predominancia en los períodos cortos menores a 0.20 segundos. La zona II B con Vs30 menores a 350 m/s (suelo S2) y presentan capas superficiales de material arenoso arcilloso de hasta 11 m de espesor. La zona IV comprende los acantilados de la Costa Verde y presenta peligros naturales altos debido a derrumbes. Finalmente, la zona V se encuentra en la playa y pie de los acantilados, presenta material de desmonte con Vs30 y períodos de vibración ambiental muy variables. Además, la zona V presenta peligro natural muy alto correspondientes a tsunamis.

ABSTRACT

Lima city has been constantly subjected to earthquakes throughout its history. The most destructive seismic event recorded occurred on October 28, 1746. This earthquake was accompanied by a tsunami that flooded and destroyed much of Callao. In addition, it caused the loss of hundreds of people and the collapse of almost all of the city's homes.

Pulido et al. (2015), as part of the activities of the SATREPS project developed in Peru from 2010 to 2015, under the coordination of the Peruvian counterpart by CISMID-FIC-UNI, concludes that the occurrence of a seismic scenario of magnitude Mw is probable. 8.9 in the central region of Peru, with a source break area of approximately 500 km long.

Villegas et al (2016) mentions that the central area of Peru, according to their seismic coupling model, can host a large earthquake in the coming decades, a large earthquake that could reach a magnitude of Mw 8.8.

The scenario that could produce the earthquake expected for the central area of Peru would have characteristics like the earthquake that occurred in 1746. Therefore, there is an urgent need to carry out studies that allow us to know the mechanical and dynamic characteristics of the soil. These studies are carried out with the purpose of understanding the seismic response and developing earthquake-resistant designs of buildings and mitigating the damage that these natural events could cause.

The districts of La Perla and San Miguel located in Metropolitan Lima and belong to the waste cone of the Rimac River. However, the CISMID-FIC-UNI work carried out in 2015 and 2016 indicates a variation in the surface materials despite being contiguous districts.

Seismic microzoning is a study aimed at identifying soil areas that may present similar behavior during the occurrence of a severe earthquake; In certain areas, precise recommendations can be given for the design and construction of earthquake-resistant buildings. The determination of these zones is carried out taking into account the topographic conditions, the geological deposits and the materials that make up the soils (types, thicknesses and consistency of the soils expressed through their mechanical and dynamic characteristics). The Peruvian Seismic Design Standard E.030 defines what the Seismic Microzonation study is

and indicates that the execution of this study will be a requirement for the determination of areas of city expansion, construction of industrial or similar complexes and reconstruction of destroyed urban areas. by earthquakes and associated phenomena. Therefore, the Seismic Microzonation Map is a very useful tool for urban planners since it will provide them with technical information that will allow them to make decisions to guide urban growth and development in a sustainable manner in a city, reducing their risk in the event of an earthquake. severe earthquake. (CISMID-FIC-UNI, 2015)

This thesis presents an update of the Seismic and Geotechnical Microzonation maps of the districts of La Perla and San Miguel where areas with similar geological, geotechnical and dynamic characteristics are established. In addition, it was possible to estimate the changes in the seismic response of the soil taking into account the variation of surface materials found in both districts.

The information collected in various studies indicates that the districts of La Perla and San Miguel present soil deposits composed of materials carried by the Rimac River. Furthermore, it has been found that in the La Perla district the clayey sandy material predominates on the surface, and underlying this is the very thick alluvial gravel. While, in the district of San Miguel, the sandy clay material is losing power in the east direction.

The seismic hazard study carried out in this work is mainly based on the model of seismogenic sources established by Roncal (2017) throughout Peru.

The geophysical studies carried out in the study area indicate that it has short period values less than 0.30 seconds. However, the works of Quispe et al. (2021) and IGP (2021) indicate the existence of long periods around 1 second. This period value could be related to very thick deep soil deposits. For this reason, in this work short periods were taken into account as long periods.

The soil response analysis was carried out from seismic scenarios in five Vs profiles between collected and executed. This analysis resulted in amplifications in the response spectrum in short periods between 0.20 and 0.30 seconds in a very rigid profile. This result was in the eastern part of the study area, where gravel deposits are found. Furthermore, in this area there is a decline in periods greater than 0.30 seconds. On the other hand, the profiles located in the western zone

present relatively higher amplifications for structural periods greater than 1 second; this may be due to the presence of flexible material at great depths.

The Seismic Microzonation map of the La Perla and San Miguel district was obtained from the Geotechnical Microzonation, Isoperiods and Vs30 maps. This is to obtain a map that integrates the geotechnical and dynamic characteristics, and that more adequately represents the soil deposits. 5 zones were defined: Zone I presents soil materials with Vs30 between 450 and 700 m/s (soils S1 and S2), with short periods less than 0.20 seconds and with superficial layers of clayey sandy material with thicknesses less than 3 m. Zone II A with Vs30 between 350 and 450 m/s (soil S2) and with a predominance of short periods less than 0.20 seconds. Zone II B with Vs30 less than 350 m/s (soil S2) and presents superficial layers of clayey sand material up to 11 m. Zone IV includes the cliffs of the Costa Verde and presents high natural hazards due to landslides. Finally, zone V is located on the beach and at the foot of the cliffs, it presents waste material with Vs30 and very variable environmental vibration periods. In addition, zone V presents very high natural hazard corresponding to tsunamis.

PRÓLOGO

En la ciudad de Lima se han realizado una gran cantidad de estudios de Microzonificación Sísmica, son destacables los trabajos realizados por el CISMID-FIC-UNI. Sin embargo, en estos últimos años se ha investigado la influencia de algunas características de los depósitos de suelos en la respuesta sísmica. Se hace mención al trabajo realizado por Quispe et al. (2019) en el que involucra a los períodos largos. Así mismo, el trabajo del IGP (2021) menciona la existencia de los períodos largo y su asociación a los estratos profundos de gran espesor. Además, la importancia del parámetro Vs30 en la clasificación de sitios, amerita su inclusión en los estudios de Microzonificación Sísmica.

En esta tesis se pretende añadir las características mencionadas a los estudios de Microzonificación Sísmica en los distritos de La Perla y San Miguel. La selección del área de estudio está basada en el cambio de materiales rígidos como la grava aluvial a capas superficiales de material más blando. Además, se estimaron perfiles profundos a partir de la ejecución de ensayos poco usuales (arreglos de microtremores). Estos perfiles fueron de gran utilidad para el cálculo de la respuesta sísmica del suelo mediante el modelo de Groholski (2016), el cual presenta una buena estimación tanto para períodos cortos como períodos largos.

Se destaca la elaboración de los mapas Vs30, los cuales zonifican el área de estudio en función a rangos de velocidades de ondas de corte, los cuales fueron determinados por normatividades (IBC y norma E-030) y por el estudio de Aguilar et al. (2019). Tanto la información recopilada como la información generada en este trabajo permitieron elaborar el mapa de Microzonificación Sísmica, el cual agrupa áreas con similares características dinámicas de suelos. Este mapa podrá ser de gran utilidad para conocer las áreas que podrían sufrir más daño ante un evento sísmico, y tomar las medidas para mitigar estos efectos.

ASESORA

LISTA DE TABLAS

Tabla N°1: Descripción general de las ondas de cuerpo.....	29
Tabla N°2: Descripción general de las ondas superficiales.....	30
Tabla N°3: Clasificación del suelo en función al parámetro Vs30 según el IBC .	37
Tabla N°4: Clasificación de sitios según la Norma E.030.....	38
Tabla N°5: Clasificación de sitios propuesta por Verdugo.....	39
Tabla N°6: Análisis de la respuesta del suelo desde distintos enfoques	59
Tabla N°7: Cantidad de exploraciones geotécnicas recopiladas en el distrito de La Perla.....	66
Tabla N°8: Cantidad de exploraciones geotécnicas recopiladas en el distrito de San Miguel.	67
Tabla N°9: Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas	75
Tabla N°10: Cantidad de ensayos geofísicos recopilados en el distrito de La Perla	80
Tabla N°11: Cantidad de ensayos geofísicos recopilados en el distrito de San Miguel	80
Tabla N°12: Cantidad de ensayos ejecutados en el distrito de La Perla	90
Tabla N°13: Cantidad de ensayos ejecutados en el distrito de San Miguel.....	90
Tabla N°14: Modelamiento de materiales del depósito de suelo considerado para el análisis unidimensional.....	99
Tabla N°15: Escenarios sísmicos seleccionados para el análisis de respuesta	102
Tabla N°16: Eventos sísmicos seleccionados para el análisis de los espectros de respuesta	107
Tabla N°17: Ubicación de las estaciones acelerográficas instaladas en el área de estudio.	107
Tabla N°18: Distancias epicentrales de los sismos reales seleccionados	107

LISTA DE FIGURAS

Figura N°1: Fotografía aérea de la zona de estudio.....	20
Figura N°2: Áreas de ruptura de sismos ocurridos a lo largo de la costa peruana	21
Figura N°3: Fuente y clasificación de los microtremores.....	31
Figura N°4: Aceleraciones espectrales pico y plataformas de espectros de respuesta esperados (475 años de periodo de retorno) para cada Vs30.....	38
Figura N°5: Módulo de corte normalizado para suelos granulares con $Cu = 20$ y $D_{50} = 25 \text{ mm}$	41
Figura N°6: Razón de amortiguamiento para suelos granulares con $Cu = 20$ y $D_{50} = 25 \text{ mm}$	42
Figura N°7: Valores de α para estimar el módulo de corte normalizado.....	42
Figura N°8: Módulo de corte normalizado para un material con índice de plasticidad $IP = 10$	43
Figura N°9: Razón de amortiguamiento para un material con índice de plasticidad $IP = 10$	44
Figura N°10: Ensayo de Refracción sísmica realizado en el distrito de San Miguel.	45
Figura N°11: Ensayo MASW realizado en el distrito de La Perla	46
Figura N°12: Ensayo de medición puntual de microtremores realizado en el distrito de San Miguel.....	47
Figura N°13: Esquematización del método H/V para estimar la función de transferencia del suelo	48
Figura N°14: Relaciones espectrales H/V para un sitio en el distrito de San Miguel.	49
Figura N°15: Ensayo de arreglos de microtremores.....	50
Figura N°16: “Viaje” de las ondas sísmicas.....	53
Figura N°17: Propagación de las ondas sísmicas desde la falla	54
Figura N°18: Propagación de las ondas sísmicas desde la roca profunda.....	55
Figura N°19: Diferencia entre los movimientos en la roca y la superficie del suelo	56
Figura N°20: Modelo de Kelvin-Voigt	56
Figura N°21: Modelo de discretización del depósito de suelo estratificado horizontalmente	58

Figura N°22: Proceso iterativo del análisis lineal equivalente	59
Figura N°23: Reglas de Masing Extendidas.....	60
Figura N°24: Comparación de los métodos MKZ y GQ/H	61
Figura N°25: Morfología del nivel freático en algunos distritos de Lima y Callao	67
Figura N°26: Sondajes analizados para verificar la variabilidad de los tipos de suelos en el área de estudio.	68
Figura N°27: Perfil estratigráfico del sondaje SPT-04_LP ubicada en el distrito de La Perla	69
Figura N°28: Perfil estratigráfico de la calicata recopilada C-75_SM ubicada en el distrito de San Miguel.....	70
Figura N°29: Mapa de distribución de los tipos de suelos encontrados a 1 metro de profundidad	71
Figura N°30: Mecanismos que gobiernan la actividad sísmica del Perú	73
Figura N°31: Árbol lógico utilizado para el análisis probabilístico.....	76
Figura N°32: Mapa de deformación de la corteza terrestre (izquierda) y de acoplamiento sísmico (derecha) para la zona de subducción del Perú	77
Figura N°33: Espectros de peligro uniforme obtenidos y espectro de diseño....	78
Figura N°34: Razones espectrales H/V recopilados del distrito de La Perla.....	81
Figura N°35: Razones espectrales H/V recopilados del distrito de San Miguel. .	81
Figura N°36: Perfiles sísmicos Vs superficiales recopilados en el distrito de La Perla	82
Figura N°37: Perfiles sísmicos Vs superficiales recopilados en el distrito de San Miguel,.....	83
Figura N°38: Perfiles sísmicos Vs profundos recopilados en el área de estudio.	84
Figura N°39: Calicata realizada muy cerca al perfil AM-03_LP	85
Figura N°40: Muestras sometidas al ensayo RC-TS	85
Figura N°41: Curva de módulo de corte normalizado del superficial del perfil AM-03_LP.....	86
Figura N°42: Curva de razón de amortiguamiento correspondiente al material superficial del perfil AM-03_LP	86
Figura N°43: Equipos de medición puntual de microtremores.....	87
Figura N°44: Equipo de Refracción Sísmica y MASW	88
Figura N°45: Distribución de sensores inscritos en una circunferencia.	89
Figura N°46: Razones espectrales H/V en el distrito de La Perla.....	91

Figura N°47: Razones espectrales H/V en el distrito de San Miguel	91
Figura N°48: Distribución de valores de periodo T1 en el área de estudio	92
Figura N°49: Distribución de valores de periodo T0 en el área de estudio	92
Figura N°50: Perfiles sísmicos Vs superficiales en el distrito de La Perla	93
Figura N°51: Perfiles sísmicos Vs superficiales en el distrito de San Miguel.....	94
Figura N°52: Distribución de Vs30 promedio en el área de estudio.	94
Figura N°53: Curvas de dispersión de los perfiles profundos.....	96
Figura N°54: Perfiles sísmicos Vs profundos	96
Figura N°55: Perfiles Vs profundos seleccionados.....	98
Figura N°56: Coeficientes de uniformidad (Cu) de la grava de Lima	100
Figura N°57: Cohesión y ángulo de fricción de la grava de Lima	101
Figura N°58: Distribución de epicentros, estaciones acelerográficas y el área de estudio	102
Figura N°59: Espectros de respuesta promedio en superficie de todos los perfiles.	104
Figura N°60: Funciones de transferencia promedio obtenidas a partir del método no lineal.....	105
Figura N°61: Espectros de respuesta promedio obtenido del análisis no lineal de los perfiles profundos.	106
Figura N°62: Ubicación de los eventos sísmicos seleccionados para el análisis comparativo.....	108
Figura N°63: Espectros de repuesta absolutos del sismo de Lagunas (2019)..	109
Figura N°64: Espectros de repuesta normalizados del sismo de Lagunas (2019).	110
Figura N°65: Espectros de repuesta absolutos del sismo de Ica (2021).	110
Figura N°66: Espectros de repuesta normalizados del sismo de Ica (2021)....	111
Figura N°67: Espectros de repuesta absolutos del sismo de Mala (2021).	111
Figura N°68: Espectros de repuesta normalizados del sismo de Mala (2021)..	112
Figura N°69: Espectros de repuesta absolutos del sismo de Callao (2021)....	112
Figura N°70: Espectros de repuesta normalizados del sismo de Callao (2021).	113
Figura N°71: Espectros de repuesta absolutos del sismo de Amazonas (2021)	113
Figura N°72: Espectros de repuesta normalizados del sismo de Amazonas (2021)	114

Figura N°73: Espectros de repuesta absolutos del sismo de Lima (2022)	114
Figura N°74: Espectros de repuesta normalizados del sismo de Lima (2022)..	115
Figura N°75: Deslizamiento producido en el acantilado el 08 de agosto de 2019.....	118
Figura N°76: Zona expuesta al sometimiento de un tsunami	119
Figura N°77: Calicata realizada en el distrito de San Miguel.....	120
Figura N°78: Calicata realizada en el distrito de La Perla	120

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- C_u : Coeficiente de uniformidad de un suelo
- DPL: Ensayo de penetración dinámica ligera
- DSHA: Análisis de peligro sísmico determinístico
- D_s : Razón de amortiguamiento
- D_{50} : Diámetro correspondiente al 50% de finos en la curva de distribución granulométrica
- G: Módulo de corte
- G_{\max} : Módulo de corte máximo
- GMPE: Ecuaciones de predicción de movimiento del suelo
- GQ/H: Modelo General Cuadrático/Hiperbólico
- HVSР: Relación espectral H/V
- H/V: División de los espectros de Fourier horizontal sobre vertical
- IP: Índice de plasticidad
- MAM: Análisis de Microtremores en Arreglo Multicanal
- MASW: Análisis Multicanal de Ondas Superficiales
- MKZ: Modelo de Kondner – Zelasko Modificado
- M_{\max} : Parámetro magnitud máxima de fuentes sismogénicas
- M_{\min} : Parámetro magnitud mínima de fuentes sismogénicas
- Mw: Magnitud momento
- \bar{N}_{60} : Número de golpes corregidos del SPT
- P_a : Presión atmosférica
- PGA: Aceleración máxima del suelo
- PSHA: Análisis de peligro sísmico probabilístico
- ρ : Densidad de un material

RC-TS:Ensayo columna resonante y corte torsional

SPT: Ensayo de penetración estándar

\bar{S}_u : Resistencia al corte en condición no drenada

T_r : Período de retorno

T_s : Período fundamental del suelo

T_0 : Periodos largos de ondas

T_1 : Periodos cortos de ondas

V_p : Velocidad de ondas de compresión

V_s : Velocidad de ondas de corte

V_{s30} : Velocidad promedio de ondas de corte de los 30 metros superiores del perfil de sitio

UHS: Espectro de peligro uniforme

v : Módulo de Poisson

σ'_m : Presión de confinamiento media

τ : Esfuerzo cortante del suelo

γ : Deformación cortante del suelo

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, Lima Metropolitana ha sido sometida a eventos sísmicos, los cuales han traído como consecuencia pérdida de vidas humanas y materiales. Por esta razón, es necesario conocer el comportamiento del suelo frente a estos eventos de tal manera que estos puedan ser considerados para el diseño sismorresistente de edificaciones.

Los estudios previos a este trabajo señalan que el distrito de La Perla presenta capas superficiales de material arenoso arcilloso de espesores que pueden llegar hasta 11 metros. Por otro lado, el distrito de San Miguel, que se encuentra contiguo al anterior, presenta una pérdida de este material en la zona nor-este. Debido a esto se puede inferir que la respuesta sísmica del suelo puede ser diferente en estos sitios a pesar de encontrarse cercanos. A partir de esas consideraciones, se definió a los distritos de La Perla y San Miguel como zonas de interés para poder zonificar áreas que comparten similares características geotécnicas y dinámicas.

1.1 GENERALIDADES

En base a las características geológicas y geotécnicas encontradas en los distritos de La Perla y San Miguel, se estableció que el área de estudio comprende a estos dos distritos, los aspectos generales de estos son los siguientes:

1.1.1 Ubicación

El área de estudio comprende los distritos de La Perla y San Miguel (Figura N°1) pertenecientes a la Provincia Constitucional del Callao y Lima Metropolitana respectivamente; conjuntamente presentan una superficie de 13.41 km² y limitan con los siguientes distritos:

- Por el norte con Bellavista (Callao) por la Av. Venezuela
- Por el noreste con Cercado de Lima
- Por el este con Pueblo Libre y Magdalena del Mar (Lima)
- Por el sur con el Océano Pacífico
- Por el oeste con el distrito de Callao.

Geográficamente pertenece a la zona 18S en el sistema WGS84, ubicándose entre 12°3'36"S y 12°5'45"S en latitud y entre 77°4'17"O y 77°7'59"O en longitud. (Ver ANEXO A-1)



Figura N°1. Fotografía aérea de la zona de estudio. Fuente: Google Earth.

1.1.2 Desarrollo urbano

Ambos distritos se encuentran completamente urbanizados y cuentan con construcciones modernas. Sin embargo, en el distrito de La Perla aún existen muchas zonas tugurizadas con construcciones antiguas.

En la Perla se encuentra el muy conocido Colegio Militar Leoncio Prado, que fue el Cuartel de la Guardia Chalaca. Mientras que San Miguel cuenta con zonas atractivas turísticas como el Parque de las Leyendas, centros comerciales, edificios, museos, centros arqueológicos y alberga el campus universitario de la Pontificia Universidad Católica del Perú y el de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

De acuerdo con los resultados del censo 2017, la población de la Perla fue de 61 417 habitantes ($22\ 333\ \text{hab}/\text{km}^2$), mientras que para San Miguel fue de 155 384 ($14\ 494\ \text{hab}/\text{km}^2$).

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A lo largo de los años, muchos sismos de alta intensidad han causado la pérdida masiva de vidas humanas y daños materiales en diversas partes del mundo. Entre estos eventos se puede mencionar a EE.UU. (1994), Japón (1995), Perú (2007), Haití (2010), entre otros; que han dejado muchas lecciones que aprender para poder mitigar daños en el futuro. Por esta razón, se ha tratado de representar la amenaza sísmica de una región en mapas de zonificación. (Panjamani, 2013).

El sismo ocurrido en Lima el 28 de octubre de 1746 fue el evento histórico más destructivo registrado en esta ciudad, el cual vino acompañado de un tsunami que arrasó con gran parte del Callao. Muchos investigadores señalan que un evento similar podría ocurrir en el futuro y por esta razón es necesario realizar estudios que permitan mitigar el desastre que este podría causar actualmente.

El estudio de Villegas et al. (2016) señala que existe un déficit de deslizamiento de las placas tectónicas. Además, señala que la liberación de esta energía acumulada (Figura N°2) podría producir un evento sísmico con magnitud 8.8 Mw aproximadamente. Este evento traería como consecuencia un gran sacudimiento en la zona central del Perú.

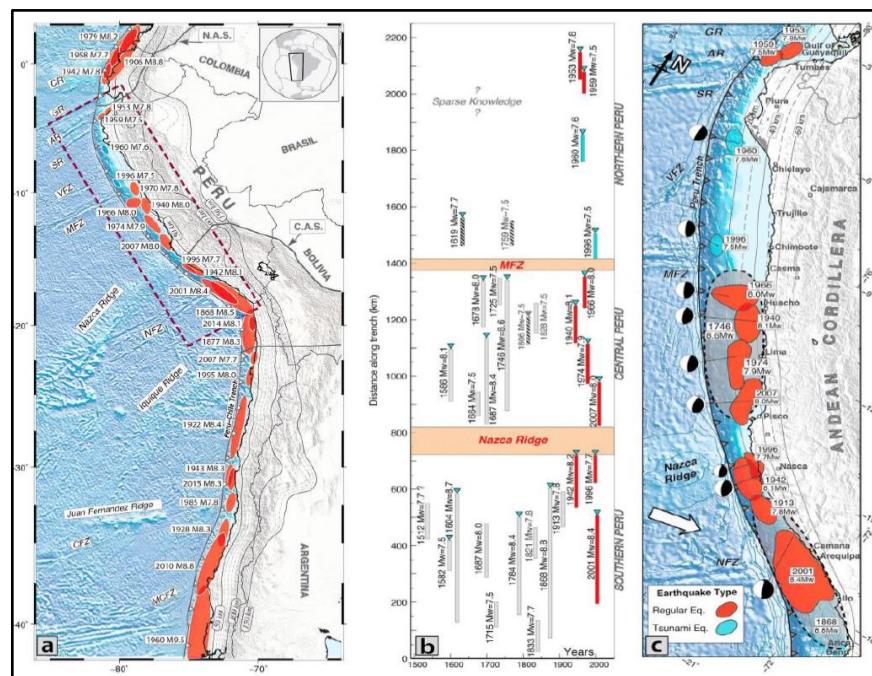


Figura N°2. Áreas de ruptura de sismos ocurridos a lo largo de la costa peruana. Tomado de Villegas et al. (2016)

La Norma de Diseño Sismorresistente (E.030) divide al Perú en 4 zonas en donde se cuantifica la sismicidad en términos de aceleraciones máximas horizontales. La ciudad de Lima se encuentra en la zona 4, es decir, la zona que presenta mayor probabilidad de ser afectada por sismos de gran magnitud. Sin embargo, dicha zonificación indica aspectos muy generales, es por esta razón que muchos países implementan la Microzonificación Sísmica. Esta herramienta involucra a los estudios de peligro sísmico, las características geológicas y geotécnicas de zonas con áreas de menor tamaño; con la finalidad de comprender su comportamiento sísmico con mayor detalle.

Los estudios realizados anteriormente a la presente tesis mostraron que los distritos de La Perla y San Miguel a pesar de ser contiguos presentan diferencias en el material del suelo a nivel superficial, en el caso del distrito de La Perla se encuentran materiales arenos arcillosos de hasta 11 metros en la zona oeste, mientras que en la zona nor-este del distrito de San Miguel se encuentran depósitos de material gravoso; estos tipos de material provocarán diferente respuesta frente a eventos sísmicos de gran magnitud.

Con base en las investigaciones antes mencionadas, se propone realizar la actualización de la microzonificación sísmica de los distritos de La Perla y San Miguel. En esa línea, es fundamental considerar la ejecución de ensayos geofísicos complementarios, tales como Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), mediciones puntuales y arreglos de microtremores. Estos ensayos permiten estimar adecuadamente la variabilidad de la rigidez y de la respuesta dinámica de los depósitos de suelo subyacente en ambos distritos.

Por otro lado, es importante mencionar que en la actualidad los distritos de La Perla y San Miguel se encuentra en proceso de modernización mediante la construcción de grandes edificaciones, las cuales deben ser diseñadas de acuerdo al actual Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), Norma E.030 Diseño Sismorresistente.

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

OBJETIVO GENERAL

Realizar la Microzonificación Sísmica de los distritos de La Perla y San Miguel, con énfasis en las diferencias en su respuesta sísmica debido a la variabilidad y transición de sus materiales superficiales y profundos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el peligro geológico de los distritos de La Perla y San Miguel, con base en investigaciones pasadas y actualizaciones específicas.
- Caracterizar el suelo de los distritos mencionados, teniendo en cuenta las exploraciones y ensayos realizados en estudios pasados y complementarios (con nuevos ensayos).
- Evaluar la amplificación sísmica para las zonas que contienen depósitos de arenas, finos y grava aluvial en la zona de estudio.

1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Diversos estudios se han realizado en los distritos de La Perla y San Miguel, de los cuales se puede mencionar a las investigaciones realizadas por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres de la Facultad de Ingeniería Civil de una Universidad Nacional de Ingeniería (CISMID-FIC-UNI). En estas investigaciones se elaboraron estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos como parte de la Microzonificación Sísmica de dichos distritos. Además, en estos distritos se encontraron depósitos de suelos de tipo arcilloso, arenoso y gravoso (CISMID-FIC-UNI, 2015).

Los estudios de Microzonificación Sísmica realizados por el CISMID-FIC-UNI han determinado que Lima Centro (Barranco, Breña, Jesús María, La Victoria, Lima, Lince, Magdalena del Mar, Miraflores, Pueblo Libre, Rímac, San Borja, San Isidro, San Miguel, Surquillo) se encuentra fundada sobre depósitos aluviales conformados principalmente por grava aluvial proveniente del río Rímac. Sin embargo, a sus alrededores la grava aluvial va perdiendo potencia, como es el caso de La Perla (Callao). En dicho distrito se han realizado exploraciones geotécnicas y se ha encontrado depósitos de arena y material fino. La presencia de estos materiales es una evidencia del cambio de tipo de suelo, los cuales podrían presentar cierta amplificación sísmica frente a un sismo de gran magnitud. Además, el sismo traería como consecuencia daños considerables a las viviendas de construcción informal y pérdidas de vidas. Por otro lado, el distrito de San Miguel presenta estos depósitos de arena y finos con muy poco espesor (zona nor-oeste) o sin presencia de estos en la zona sur-este. Entonces, se puede estimar que la amplificación sísmica en este distrito sería más baja y, como consecuencia, presentaría una intensidad relativamente menor. Por estas razones, el área de estudio del presente trabajo comprende principalmente los distritos de La Perla y San Miguel.

Las características geomorfológicas anteriormente mencionadas fueron obtenidas a partir de exploraciones directas (calicatas) y ensayos sísmicos indirectos ejecutados por CISMID-FIC-UNI. Entre los ensayos sísmicos se puede mencionar las mediciones de microtremores para la estimación del periodo fundamental del suelo (Nakamura, 1989), y el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales - MASW (Park, 1999) para la determinación del perfil sísmico del suelo. Especial mención merecen los ensayos de arreglos de microtremores, debido a su gran utilidad en

la elaboración de perfiles profundos de velocidades de ondas de corte, especialmente en áreas de estudio ubicadas en zonas altamente urbanizadas (Quispe, 2014). Existen diversos métodos mediante los cuales se pueden determinar curvas de dispersión de ondas superficiales, entre los que se puede mencionar al método SPAC (Aki, 1957), F-k (Capon, 1969) y CCA (Cho, 2004).

En el trabajo de Quispe et al. (2015), se determinaron cinco perfiles de velocidades de ondas de corte ubicados en distintos puntos de Lima Metropolitana, a fin de evaluar su amplificación sísmica real considerando su estructura profunda. En dicho estudio, se emplearon ensayos de arreglos de microtremores. Uno de los puntos de medición se encuentra en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), ubicada en el distrito de San Miguel, la cual se halla sobre depósitos de grava de compacidad media a densa (CISMID-FIC-UNI, 2015). Por otro lado, en el trabajo de Gonzales et al. (2020) se estimó un perfil de velocidades de onda de corte (V_s) ubicado en el Colegio Militar Leoncio Prado (a 3.70 km de la PUCP); en donde, gracias a las exploraciones de suelos se ha encontrado espesores importantes de material arenoso-limoso. Estos estudios conllevan a deducir que el comportamiento sísmico de los depósitos de suelo que se encuentran en ambos distritos es distinto, a pesar de encontrarse relativamente cercanos entre sí, perteneciendo al mismo cono deyectivo del río Rímac, lo cual es conocido como efecto de microzona (Kuroiwa, 1991).

Los estudios realizados por el IGP (2021), que incluyen la estimación de perfiles sísmicos de velocidades de ondas de corte (V_s) y relaciones espectrales H/V, muestran la presencia de picos tanto en periodos cortos como en periodos largos. Estos periodos largos pueden estar relacionados a depósitos de suelos profundos de gran espesor. Por otro lado, el trabajo de Quispe et al. (2021) también señala la amplificación de los suelos de San Miguel para periodos largos. Por estas razones, también resulta importante considerar la existencia de estos periodos largos.

El trabajo realizado por Roncal (2017) comprende el modelamiento de las fuentes sismogénicas a nivel regional con la finalidad de obtener espectros de peligro uniforme que permitan estimar las aceleraciones. Este modelamiento fue principalmente realizado en base a las características sismotectónicas, la sismicidad, los mecanismos de falla, entre otros. La importancia del trabajo de Roncal (2017) radica en obtener las aceleraciones en un material muy rígido como

una roca y posteriormente mediante un análisis numérico unidimensional obtener la respuesta del suelo en superficie.

1.5 METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Teniendo un área de estudio definida, se requiere de una serie de pasos que permitan definir zonas que compartan características geológicas, geotécnicas y dinámicas similares para finalmente elaborar un mapa de Microzonificación Sísmica. La zonificación del área de estudio permitirá comprender la respuesta sísmica del suelo frente a escenarios basados en los mecanismos sismotectónicos que presenta la ciudad de Lima.

El desarrollo de la presente tesis se basó en la metodología empleada por el CISMID-FIC-UNI, debido a su vasta experiencia en estudios de microzonificación sísmica. Esta metodología comprende una serie de pasos basados principalmente en recopilación de información, ejecución de ensayos para obtener datos en campo, la interpretación de resultados y finalmente la elaboración de los mapas de zonificación.

La recopilación de información para el desarrollo de la presente tesis tiene principalmente como base un conjunto de exploraciones y ensayos elaborados para los proyectos de Microzonificación Sísmica del CISMID-FIC-UNI en los años 2015 y 2016. Sin embargo; también se recopilará información adicional de otros proyectos de investigación realizados en la zona de estudio. En el ámbito geológico, se hará uso de la información que proporciona libremente el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Sin embargo, en algunos casos, existe una carencia de datos en algunas zonas del área del estudio, la cual será completada mediante una campaña de ensayos geofísicos con la finalidad de llenar los vacíos que se han presentado.

Esta campaña de exploración de campo consistirá en la ejecución de ensayos geofísicos, tales como arreglos de microtremores, líneas sísmicas y medición puntual de microtremores. La interpretación de los resultados, productos de los ensayos realizados en campo, debe presentar coherencia con la información recopilada. La integración de la información recopilada y obtenida permitirá elaborar mapas de zonificación con un mejor detalle; y además, poder relacionarlo con la respuesta sísmica del suelo debido a la variabilidad de materiales superficiales encontrados en el área de estudio.

1.6 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La organización de la tesis comprende etapas las cuales están basadas en la metodología empleada por el CISMID-FIC-UNI (2015) para los trabajos de microzonificación sísmica. Además, la información recopilada, fue ordenada desde una perspectiva general hasta detalles muy específicos de los materiales.

Los capítulos que comprende la presente tesis son los siguientes:

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Se mencionará los aspectos generales acerca de la tesis como generalidades, descripción del problema, el objetivo general, objetivos específicos y antecedentes investigativos y metodología del trabajo.

CAPÍTULO II: MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Se mencionarán los principales conceptos que permitirán el desarrollo de la tesis, además comprende el marco teórico que involucra diferentes temas tales como: el análisis de peligro sísmico, ondas sísmicas, propiedades dinámicas del suelo, prospección geofísica, método de Nakamura, la estimación del perfil sísmico y el análisis de respuesta unidimensional. Estos temas son direccionados para la elaboración de la microzonificación sísmica de los distritos de La Perla y San Miguel.

CAPÍTULO III: CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS

En este capítulo se describirán las características geológicas que presenta el área de estudio, las cuales están basados principalmente en los trabajos del INGEMMET. Se explicará el origen de los materiales que componen el suelo de fundación del área de estudio. Además, se presentan las características físicas y mecánicas encontradas en exploraciones de suelos y ensayos de laboratorio recopiladas en trabajos anteriores, estimación del nivel freático y mapas de tipos de suelo.

CAPÍTULO IV: PELIGRO SÍSMICO

En este capítulo se evaluará el análisis de peligro sísmico probabilístico basado en las características sismotectónicas del área de estudio a nivel regional y local. Esta evaluación se realizó con la finalidad de obtener espectros de peligro

uniforme correspondientes a periodos de retorno de 475 años, los cuales serán comparados con los espectros de diseño que presenta la norma peruana E-030.

CAPÍTULO V: CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

En este capítulo se explicará las propiedades dinámicas de los materiales que componen los depósitos de suelo, las cuales están basadas en las ondas sísmica. También se tratará los principales parámetros que los últimos estudios y códigos vigentes exigen para la clasificación de suelos. Además, se explicarán los ensayos realizados para obtener las propiedades dinámicas y el procesamiento de la data obtenida en campo.

A diferencia de los proyectos de Microzonificación Sísmica presentados en los trabajos del CISMID-FIC-UNI, en este capítulo se analizará los periodos largos encontrados en los ensayos de arreglos de microtremores. Estos resultados pueden indicar que los depósitos de grava que se encuentra en la ciudad de Lima podrían tener amplificaciones importantes en periodos largos, como se indica en el trabajo de Quispe (2021). Además, se tratará la estimación de perfiles profundos con la finalidad de evaluar la respuesta sísmica en distintos puntos del área de estudio.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO

Los resultados obtenidos en los capítulos IV y V serán tratados con la finalidad de evaluar la respuesta sísmica del suelo frente a escenarios sísmicas seleccionados, teniendo en cuenta el mecanismo sismotectónico que presenta el área de estudio. En este capítulo se desarrolla un análisis de respuesta de sitio bajo un enfoque lineal equivalente y no lineal y además se hará uso del modelo no lineal GQ/H de tal manera que represente el comportamiento histerético del suelo. Además, se presenta un análisis de sensibilidad para caracterizar dinámicamente el depósito de grava que presenta el área de estudio.

CAPÍTULO VII: MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

En este capítulo se presentarán los mapas finales, producto del resultado de los capítulos anteriores, los cuales son:

- ✓ Mapa de Peligros naturales
- ✓ Mapa de Microzonificación geotécnica (recopilado)
- ✓ Mapa de isoperíodos largos T0

- ✓ Mapa de isoperíodos cortos T1
- ✓ Mapa de Vs30 según el IBC
- ✓ Mapa de Vs30 según la norma peruana E-030
- ✓ Mapa de Vs30 según el trabajo de Aguilar (2019)
- ✓ Mapa de Microzonificación sísmica

CAPÍTULO II. MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Geográficamente el Perú es atravesado por el Cinturón de Fuego del Pacífico, la interacción de las placas tectónicas Nazca y Sudamericana convierten al Perú en uno de los países con mayor actividad sísmica. Como consecuencia de los sismos generados por la interacción de placas se produce cuantiosas pérdidas de vidas humanas y económicas. Por esta razón que se han realizado numerosas investigaciones con la finalidad de poder mitigar estos desastres.

La interacción de las placas tectónicas produce liberación de energía en forma de ondas desde el interior de la Tierra hasta la superficie terrestre. Entonces, es necesario contar con conocimientos en ondas sísmicas de modo que podamos comprender la propagación de estas en el interior de la tierra y en capas superficiales.

Además, otra ventaja que otorga el conocimiento de las ondas sísmicas es que nos permiten estimar las características dinámicas de la estructura del suelo mediante la ejecución de ensayos geofísicos.

2.1 ONDAS SÍSMICAS

Las ondas sísmicas tienen su origen en el interior de la Tierra a nivel de Litósfera. Estas ondas son el producto de una liberación de energía producida por el rozamiento o colisión entre grandes masas de material rocoso (principalmente entre placas tectónicas o fallas geológicas). Además, estas ondas se propagan a través de la corteza terrestre con distintas velocidades dependiendo del medio que atraviesa. Las primeras ondas sísmicas en liberarse son las ondas de cuerpo (Tabla N°1), que una vez que llegan a la superficie dan origen a las ondas superficiales (Tabla N°2).

Tabla N°1. Descripción general de las ondas de cuerpo

Ondas de cuerpo	
Ondas P	Ondas S
✓ También llamadas Ondas compresivas o primarias.	✓ También llamadas Ondas de corte o secundarias.
✓ Son las primeras ondas en liberarse, además son las que se propagan más rápido a través de la Tierra y como consecuencia son las primeras en ser registradas en un evento sísmico.	✓ Se propagan más lento que las ondas P, por lo que son las segundas en ser registradas, sin embargo, presentan una amplitud mayor que las ondas P.

Ondas de cuerpo	
Ondas P	Ondas S
✓ El movimiento de las partículas del medio es en la misma dirección de su propagación.	✓ El movimiento de las partículas del medio es en dirección perpendicular a su dirección de propagación.
✓ Se puede propagar tanto en sólidos como en fluidos.	✓ El movimiento puede ser atribuido a dos componentes ortogonales: uno horizontal (onda SH) y otro vertical (SV).
	✓ No se propaga en fluidos.

Tabla N°2. Descripción general de las ondas superficiales

Ondas superficiales	
Ondas Love	Ondas Rayleigh
✓ Se originan en la interfase de dos medios con propiedades mecánicas diferentes.	✓ Se originan en la superficie de la Tierra, son resultado de la interferencia de las ondas P y las ondas SV.
✓ El movimiento de las partículas del medio es perpendicular a su dirección de propagación.	✓ El movimiento de las partículas del medio es de forma elíptica y se consideran que está limitado a un plano vertical.
✓ Presentan el fenómeno de la dispersión.	✓ Presentan el fenómeno de la dispersión.

Microtremores

Los microtremores, microvibraciones, ruido ambiental o microtrepidaciones son ondas provenientes de actividades urbanas (tráfico, fábricas, etc.) y fuentes naturales como se observa en la Figura N°3. Estas vibraciones ocurren en el intervalo de frecuencias de 0.01 a 30 Hz. Sin embargo, para la exploración geofísica sólo interesa la banda de 0.1 a 10 Hz, ya que en esta banda parte de la energía se transmite como Ondas Rayleigh, cuyos modos y velocidades se puede estimar.

Según Bard (1998) se pueden distinguir los siguientes casos:

- ✓ Periodos largos (por debajo de 0.3 a 0.5 Hz): Causados por ondas oceánicas a grandes distancias.
- ✓ Periodos intermedios (entre 0.3 – 0.5 Hz y 1 Hz): Generadas por olas del mar y el viento.
- ✓ Periodos cortos (entre 1 – 30 Hz): relacionados a la actividad humana.

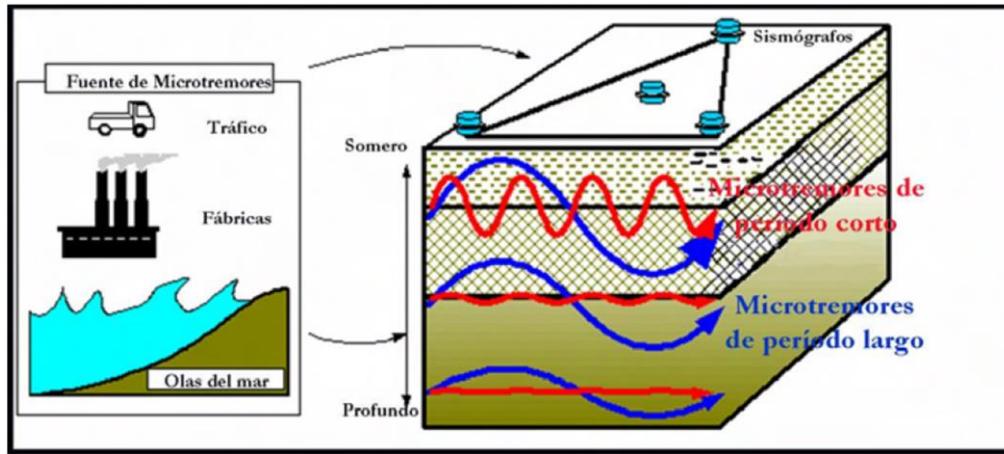


Figura N°3. Fuente y clasificación de los microtremores. Tomado de Linares (2005)

Para poder cuantificar la intensidad que produciría un sismo de gran magnitud, es necesario emplear metodologías que involucren las características sismotectónicas de la región y poder estimar la demanda sísmica en el área de estudio. En la presente tesis se hará uso del análisis de peligro sísmico para estimar las máximas aceleraciones del suelo y el espectro de peligro uniforme a nivel de roca rígida.

2.2 ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

El análisis de peligro sísmico consiste en la estimación cuantitativa del movimiento del suelo causado por la actividad sísmica de un determinado lugar (Kramer, 1996), para ello, es importante identificar los siguientes aspectos de la región:

- ✓ Características geológicas
- ✓ Rasgos tectónicos
- ✓ Sismicidad histórica
- ✓ Sismicidad instrumental

Existen dos enfoques para la determinación del peligro sísmico, ellos son el análisis determinístico (DSHA) y el análisis probabilístico (PSHA). El DSHA involucra un escenario sísmico particular para la zona de interés, el cual debe ser una representación de un evento sísmico característico que es proveniente de la fuente que se encuentra a menor distancia (Kramer, 1996). Mientras que el PSHA introducido por Cornell (1968), consiste en identificar y cuantificar las incertidumbres relacionadas con la magnitud, localización, recurrencia y efectos de los sismos. Estas incertidumbres se combinan para estimar la probabilidad de excedencia de un movimiento sísmico en términos de un parámetro de interés

(generalmente la aceleración máxima del suelo) dentro de un periodo de tiempo establecido. En la actualidad la tendencia es realizar el análisis probabilístico ya que dependiendo del tipo de proyecto se establece un periodo de retorno y se estiman las aceleraciones máximas del suelo. Sin embargo, a manera de complemento es usual elaborar un análisis determinístico.

El presente trabajo se basa en el PSHA para estimar las aceleraciones máximas del suelo del área de estudio. Este análisis comprende fundamentalmente cuatro pasos (Reiter, 1990):

- a) Identificación y caracterización de las fuentes sismogénicas.
- b) Determinación de la distribución temporal de los eventos sísmicos (leyes de recurrencia) para cada fuente sismogénica.
- c) Selección de las leyes de atenuación (GMPE) que permitan describir el movimiento sísmico en el punto de interés.
- d) Desarrollar las curvas de peligro sísmico.

2.2.1 Caracterización de las fuentes sismogénicas

a) Incertidumbre en la localización

Para el análisis de peligro sísmico probabilístico es necesario considerar el factor distancia entre el punto de interés y la fuente sismogénica. Entonces, se establece una función de densidad de la distancia. Para calcular esta función, la fuente sismogénica es dividida en volúmenes iguales y se determina las distancias entre el punto de interés y el centro de cada elemento de volumen. Cada par ordenado obtenido es plasmado en un histograma de distancia de la fuente al punto de interés, obteniendo así la función de densidad de distancia. En algunos casos cuando se tiene suficiente información de la fuente sismogénica y sea justificable, es posible asignar un peso a cada uno de los elementos de volumen; es decir, considerarla como una distribución no uniforme.

b) Incertidumbre en el tamaño

Los catálogos sísmicos nos proporcionan información de la magnitud de los sismos. Sin embargo, en muchos casos esta información presenta diferencias en sus escalas y resulta difícil establecer una comparación entre las magnitudes proporcionadas. La homogenización es una herramienta que nos permite llevar esta data sísmica a una única escala. Generalmente la escala sismológica utilizada para los proyectos de ingeniería es la Magnitud Momento (M_W) que se

basa en la medición de la energía total que libera un sismo. La ventaja que presenta la escala M_w frente a otras escalas de magnitud sísmica es que no se satura para valores altos; es decir, sus valores difieren para sismos de gran magnitud.

Generalmente el método probabilístico se basa en el modelo de Poisson, el cual considera eventos independientes en el espacio y tiempo. Por este motivo, es necesario realizar una depuración de la información sísmica de eventos premonitores o réplicas de un sismo y se considera únicamente a los eventos principales.

La distribución del tamaño de los sismos correspondiente a un periodo de tiempo determinado está representada por una ley de recurrencia. Generalmente para el PSHA se utiliza la ley de Gutenberg-Richter, que relaciona la frecuencia y magnitud de la actividad sísmica de una región.

Ley de Gutenberg-Richter (1944)

Esta expresada de la siguiente manera:

$$\log \lambda_m = a - b \times m \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

λ_m : Es el número de sismos de magnitud igual o mayor a “ m ” por unidad de tiempo.

a, b : Parámetros propios de la región (constantes).

La inversa del parámetro λ_m es definido como periodo de retorno (T_r), entonces:

$$T_r = \frac{1}{\lambda_m} \quad \text{Ecuación 2}$$

Ley de Gutenberg-Richter truncada (McGuire y Arabasz, 1990)

La ley G-R clásica cubre un rango de magnitudes que van desde $-\infty$ a $+\infty$, en algunos casos predice resultados erróneos e irreales; es por esta razón que el rango se trunca en función una magnitud mínima ($M_{mín}$) y una magnitud máxima ($M_{máx}$)

2.2.2 Leyes de atenuación

Un evento sísmico es ocasionado por una liberación de energía en forma de ondas sísmicas (ondas P y S) a nivel del hipocentro. El movimiento generado por esta liberación de energía se va amortiguando a medida que se aleja del foco sísmico; es decir, la onda va a disminuir en su amplitud y va a sufrir cambios en su contenido de frecuencias. En el PSHA para poder describir este amortiguamiento del suelo se emplean las leyes de atenuación.

Las leyes de atenuación o ecuaciones de predicción de movimiento del suelo (GMPEs por sus siglas en inglés) son expresiones matemáticas empíricas que estiman la respuesta sísmica del suelo. Esta respuesta está asociado a un evento de magnitud M y a una distancia r de la fuente en términos de un parámetro particular Y , tal como la aceleración máxima del suelo (PGA). La aplicabilidad de una GMPEs va a depender de las características tectónicas de la región y del criterio ingenieril.

2.2.3 Incertidumbre en el tiempo

Para calcular las probabilidades de ocurrencia de un sismo en un periodo de tiempo de interés, es común considerar que los eventos sísmicos ocurren aleatoriamente en el tiempo. Para el desarrollo de la incertidumbre en el tiempo se emplean modelos estadísticos.

Generalmente para el PSHA se utiliza el modelo de Poisson, el cual presenta un buen ajuste de ocurrencia temporal para eventos sísmicos de gran sacudimiento. Este modelo es aplicado bajo las siguientes consideraciones (Kramer, 1996):

- ✓ El número de ocurrencias en un periodo de tiempo son independientes del número que ocurren en cualquier otro periodo de tiempo.
- ✓ La probabilidad de ocurrencia de un evento en un periodo de tiempo corto es proporcional a la longitud del periodo de tiempo considerado.
- ✓ La probabilidad de que ocurra más de un evento en un periodo de tiempo corto es nula.

2.2.4 Cálculo del peligro sísmico probabilístico

a) Curvas de peligro sísmico

Las curvas de peligro sísmico son obtenidas a partir de la combinación de las incertidumbres mencionadas anteriormente de todas las fuentes sismogénicas

consideradas para el PSHA. La probabilidad de que un parámetro de movimiento sísmico Y sea mayor a un valor particular y^* se calcula de la siguiente manera:

$$P[Y > y^*] = \int \int P[Y > y^* | m, r] f_M(m) f_R(r) dm dr \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde $P[Y > y^* | m, r]$ es obtenido de las leyes de atenuación y $f_M(m)$ y $f_R(r)$ son las funciones de densidad de magnitud y distancia respectivamente. La ecuación 3 es calculada usando programas de cómputo como el R-CRISIS y es combinada con el modelo de Poisson, quedando:

$$P[Y_T > y^*] = 1 - e^{-\lambda_{y^*} T}$$

Donde:

$P[Y_T > y^*]$: probabilidad de que ocurra un evento sísmico mayor a y^* en un periodo de tiempo T .

λ_{y^*} : tasa de excedencia anual; su inversa es el periodo de retorno T_r .

T : tiempo de exposición sísmica o vida útil de la estructura.

El espectro de peligro uniforme (UHS por sus siglas en inglés) se determina tabulando los valores de las aceleraciones esperadas correspondientes a un periodo de retorno específico para diferentes periodos estructurales.

b) Método de los árboles lógicos

Los cálculos de probabilidad utilizados para el PHSA inevitablemente contienen errores epistémicos tanto en los parámetros de incertidumbres como en las leyes de atenuación, es decir, presentan diferencia entre los valores observados y calculados. Entonces, para tratar estas diferencias se hace uso de árboles lógicos que otorguen un peso a cada parámetro y ley de atenuación empleada, estos son ponderados a fin de refinar el cálculo probabilístico. El peso de las ramas del árbol lógico puede ser obtenido mediante un tratamiento estadístico o en base a un juicio experto.

La evaluación de peligro sísmico en un área de estudio permite obtener los espectros de peligro uniforme a nivel de roca rígida. Sin embargo, para poder estimar el movimiento del suelo en la superficie es importante conocer las

características del sitio y cómo las ondas sísmicas se van a propagar sobre el depósito de suelo.

2.3 PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO

Las propiedades dinámicas del suelo son un tema fundamental para describir el comportamiento del suelo frente a solicitudes sísmicas. Es importante entender que la estimación de estas propiedades va a depender del problema geotécnico-sísmico y del método que se utilice para estimar esas propiedades de interés. En algunos casos se va a requerir conocer las propiedades frente a grandes deformaciones (presas), así como en otros casos conocerlas para pequeñas deformaciones (cimentación de maquinarias). A continuación, se hará una breve descripción de las principales propiedades dinámicas utilizadas en la presente tesis:

2.3.1 Velocidad de onda de corte

Cuando el suelo es excitado por un agente externo, como puede ser un sismo, las ondas de corte van a viajar a través del material rocoso o el suelo generando esfuerzos de corte en el medio recorrido. Además, sabiendo que el suelo generalmente falla por excesos de esfuerzos de corte, es muy común caracterizar al suelo en términos de velocidad de onda de corte (V_s). Es posible correlacionar la rigidez del suelo con el V_s teniendo en cuenta que un suelo rígido está asociado a un V_s relativamente alto y un suelo blando está asociado a un V_s relativamente bajo.

Debido a que la rigidez cortante del suelo está asociado a la deformación del suelo debido a esfuerzos cortantes, la teoría de ondas sugiere una expresión (ecuación 4) que relaciona la velocidad de onda de corte y el módulo de corte (Kramer, 1996):

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde V_s es la velocidad de onda de corte, G es el módulo de corte y ρ es la densidad del material.

Los parámetros V_p y V_s pueden combinarse para obtener el módulo de Poisson (ν), siendo este un parámetro elástico importante que nos indica la deformabilidad del suelo como se muestra en la ecuación 5 (Kramer, 1996).

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Siendo el suelo un material que falla debido a esfuerzos cortantes, la velocidad de onda de corte es un parámetro importante para la caracterización dinámica del suelo: además, es utilizada en muchos códigos de clasificación de sitios como el IBC (Tabla N°3). Actualmente en el Perú se encuentra vigente de uso obligatorio la Norma Técnica E.030 Diseño Sismoresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones – 2018 (Tabla N°4) que presenta una clasificación de sitios en base a 3 parámetros: velocidad promedio de ondas de corte (V_{s30}), promedio del número de golpes en el Ensayo de Penetración Estándar (\bar{N}_{60}) y el promedio de la resistencia al corte en condición no drenada (\bar{s}_u). El presente trabajo dará mayor énfasis al primer parámetro mencionado.

Velocidad promedio de las ondas de corte (V_{s30})

La caracterización de los depósitos de suelos mediante el parámetro V_{s30} es utilizado por una gran variedad de códigos internacionales, la NTP E.030 indica la expresión:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{Si}}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde: d_i es el espesor de cada uno de los n estratos y V_{Si} es la correspondiente velocidad de ondas de corte (m/s).

Tabla N°3. Clasificación del suelo en función al parámetro V_{s30} según el IBC. Tomado del IBC (2006)

Tipos de suelos según IBC		
Tipo	V_{s30} (m/s)	Descripción
A	> 1500	Roca dura
B	760 - 1500	Roca
C	360 - 760	Roca blanda y suelo muy denso
D	180 - 360	Suelo rígido
E	< 180	Suelo blando
F	Suelos especiales (licuables, colapsables, arcillas muy plásticas, suelos orgánicos)	

Tabla N°4. Clasificación de sitios según la Norma E.030. Tomado de la norma peruana E-030 (2016)

Clasificación de los perfiles de suelos de la Norma E-030					
Perfil	Tipo	Vs (m/s)	N ₆₀	S _u (kPa)	
S ₀	Roca dura	> 1500	-	-	
S ₁	Roca o suelos muy rígidos	500 a 1500	> 50	> 100	
S ₂	Suelos intermedios	180 a 500	15 a 50	50 a 100	
S ₃	Suelos blandos	< 180	< 15	25 a 50	
S ₄	Condiciones excepcionales	Clasificación basada en el EMS			

Un estudio elaborado por Aguilar et al (2019) tiene como base una serie de análisis de respuesta realizados en perfiles de suelo representativos en la costa peruana. Este estudio recomienda discretizar la clasificación de tipos de suelo de la Norma Peruana E-030, refiriéndose en subdividir el suelo S2 en dos rangos (Figura N°4), los cuales son: de 200 a 350 m/s y de 350 a 500 m/s.

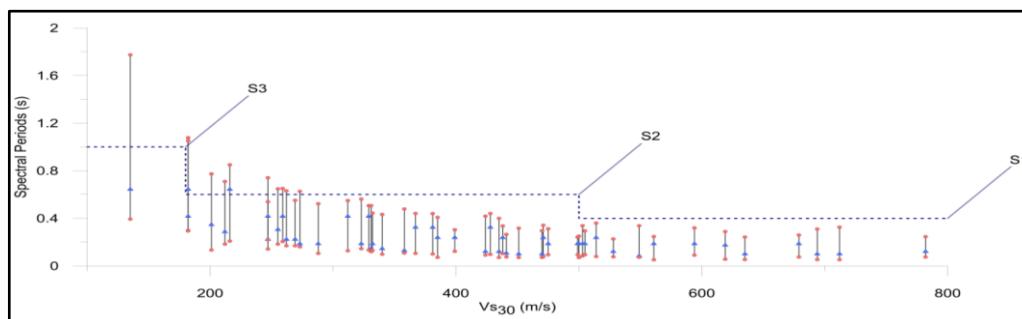


Figura N°4. Aceleraciones espectrales pico y plataformas de espectros de respuesta esperados (475 años de periodo de retorno) para cada Vs30. Tomado de Aguilar et al. (2019)

2.3.2 Período fundamental del suelo

El período fundamental del suelo es un parámetro que nos permite estimar los efectos locales de sitio frente a eventos sísmicos. La importancia de este parámetro radica en que, si las estructuras que tienen un valor de período cercano al período fundamental del suelo donde se ha cimentado, se va a presentar el fenómeno de resonancia; lo que significa que habrá una sincronización de movimiento entre el suelo y la estructura, siendo esta última sometida a grandes esfuerzos y desplazamientos.

Diversas observaciones y estimaciones matemáticas determinaron que existe una relación inversa entre la rigidez del suelo y su periodo fundamental; es decir, un material rígido va a estar asociado a un valor pequeño de periodo fundamental, mientras que un material blando va a presentar períodos altos, esto puede ser observado en la ecuación 7:

$$T_S = \frac{4H}{V_S} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde T_S es el periodo fundamental, H es el espesor y V_S es la velocidad de onda de corte correspondiente al depósito del suelo.

En el intento de tener una mejor representación dinámica del suelo, Pitilakis et ál. (2013) propusieron un sistema de clasificación de sitios basada en los siguientes parámetros: periodo fundamental del suelo, velocidad de onda de corte promedio en el depósito de suelo completo, espesor del depósito de suelo, número de golpes del SPT, índice de plasticidad y la resistencia al corte. Sin embargo, la estimación de algunos de estos parámetros resulta complicada. Por esta razón, el trabajo de Verdugo (2019) propone un sistema de clasificación de sitios (Tabla N°5) basados el periodo predominante obtenido del HVSR ($T_{H/V}$) y la velocidad de onda de corte equivalente (V_{S30-E}), determinada de la siguiente manera:

$$V_{S30-E} = \frac{120}{T_{F-30}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde T_{F-30} es el periodo fundamental teórico calculado a partir de la estratigrafía correspondiente a los primeros 30 superiores del perfil de sitio.

Tabla N°5. Clasificación de sitios propuesta por Verdugo. Tomado de Verdugo (2019)

Clasificación de sitio	Descripción general	V_{S30-E} (m/s)	$T_{H/V}$ (s)
A	Roca	≥ 800	/
B	Suelos muy densos	≥ 500	< 0.30 (o plano)
C	Suelo firme, denso Suelo medianamente denso	≥ 300	< 0.50 (o plano)
D	firme o medianamente denso	≥ 180	< 0.80
E	Suelos blandos	< 180	/
F	Suelos especiales	-	

2.3.3 Módulo de corte y razón de amortiguamiento

El módulo de corte hace referencia a la relación que existe entre el esfuerzo cortante cíclico aplicado y la deformación cortante generada del suelo. Este parámetro depende principalmente de las siguientes características: confinamiento efectivo, índice de vacíos, edad geológica, cementación, OCR, índice de plasticidad y ciclos de carga.

El módulo de corte máximo (G_{max}) de un material se determina a partir de la densidad (ρ) y de la velocidad de onda de corte (V_s) de la siguiente manera:

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad \text{Ecuación 9}$$

La razón de amortiguamiento del suelo indica la relación de disipación de energía con la energía de deformación elástica cuando un suelo es cíclicamente excitado. Tanto el valor del módulo de corte como la razón de amortiguamiento tienen una dependencia del nivel de la deformación cíclica cortante del suelo. En el caso de del módulo de corte su valor disminuye a medida que la deformación cortante aumenta. Contrariamente, la razón de amortiguamiento aumenta a mayor nivel de deformación cortante del suelo. Estas características se pueden observar cuando el suelo es sometido a cargas cíclicas y presenta ciertos niveles de deformación (degradación del suelo) que consecuentemente se verá reflejado en los cambios del módulo cortante y razón de amortiguamiento.

En la literatura podemos encontrar una gran variedad de modelos que describen las trayectorias de estos dos parámetros (módulo de corte y razón de amortiguamiento) para cada nivel de deformación, a esto se le denomina curvas de degradación.

Las curvas de degradación encontradas en la literatura se encuentran respaldadas por numerosos ensayos de laboratorio y la selección de cada modelo dependerá del material que será representado. A continuación, se mencionará las curvas de degradación empleadas en el presente trabajo:

- ✓ **Modelo de Menq (2003)**

El modelo de Menq (2003) fue calibrado para materiales granulares como arenas y suelos gravosos. Los parámetros de Menq más influyentes en la degradación de estos son: El diámetro correspondiente al 50% de finos en la curva de distribución granulométrica (D_{50}), el coeficiente de uniformidad (C_u) y el esfuerzo de

confinamiento efectivo (σ'_0). El módulo cortante normalizado G/G_{max} es determinado de la siguiente manera:

$$G/G_{max} = \frac{1}{1 + (\frac{\gamma}{\gamma_r})^\alpha} \quad \text{Ecuación 10}$$

En donde γ es la deformación cortante, γ_r es una deformación de referencia que depende del coeficiente de uniformidad y del esfuerzo de confinamiento efectivo y α es un coeficiente de curvatura que depende del esfuerzo de confinamiento efectivo. Por otro lado, la razón de amortiguamiento D_s es determinada de la siguiente manera:

$$D_s = b \left(G/G_{max} \right)^{0.1} D_{Masing} + 0.55 C_u^{0.1} D_{50}^{-0.3} \left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right)^{-0.08} \quad \text{Ecuación 11}$$

En donde b es un parámetro que depende del número de ciclos, D_{Masing} es el amortiguamiento basado en el comportamiento de Masing y P_a es la presión atmosférica. Las Figuras N°5 y 6 muestran las curvas de degradación de Menq para valores de $C_u = 20$, $D_{50} = 25 \text{ mm}$ y distintos valores de presiones de confinamiento efectivo.

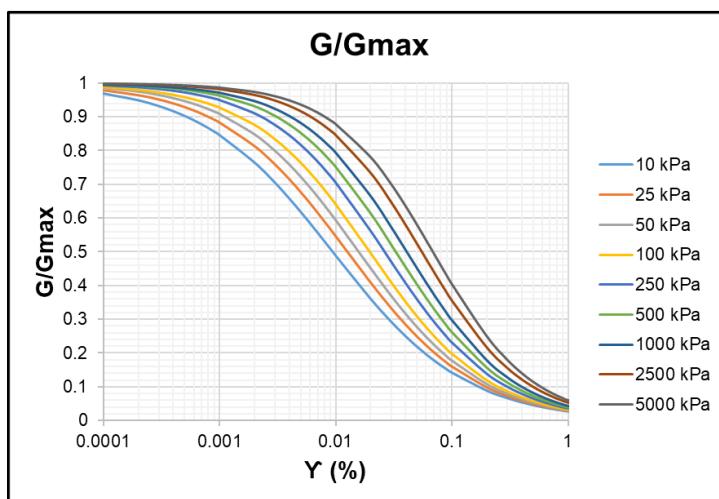


Figura N°5. Módulo de corte normalizado para suelos granulares con $C_u = 20$ y $D_{50} = 25 \text{ mm}$ propuesto por Menq (2003).

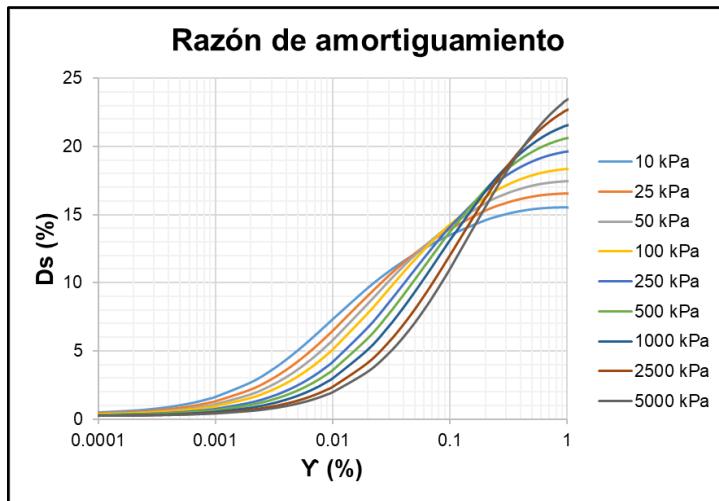


Figura N°6. Razón de amortiguamiento para suelos granulares con $C_u = 20$ y $D_{50} = 25 \text{ mm}$ propuesto por Menq (2003).

✓ Modelo de Zhang (2005)

El modelo de Zhang (2005) es aplicado para material de suelos cuaternarios, terciarios y más antiguos. Su formulación depende principalmente del índice de plasticidad (IP) y de la presión de confinamiento media (σ'_m). La expresión que calcula el módulo de corte normalizado tiene la misma forma que la ecuación 10, sin embargo, el modelo de Zhang (2005) modifica el parámetro α que ahora depende de la edad geológica y del índice de plasticidad como se muestra en la Figura N°7.

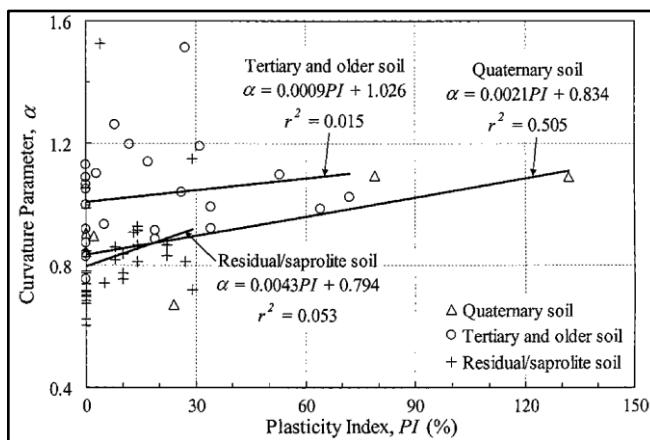


Figura N°7. Valores de α para estimar el módulo de corte normalizado. Tomado de Zhang (2005).

Por otro lado, la deformación de referencia se determina mediante la siguiente expresión:

$$\gamma_r = \gamma_{r1} (\sigma'_m / P_a)^k \quad \text{Ecuación 12}$$

En donde σ'_m es la presión de confinamiento media, P_a es la presión atmosférica, γ_{r1} y k son parámetros que dependen de la edad geológica y del índice de plasticidad.

La razón de amortiguamiento (D_s) presenta una dependencia del módulo cortante normalizado y es expresado de la siguiente manera:

$$D_s = 10.6 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 31.6 \left(\frac{G}{G_{max}} \right) + 21 + [0.008(IP) + 0.82] \left(\frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^{-0.5k} \quad \text{Ecuación 13}$$

Las Figuras N°8 y 9 muestran las curvas de degradación de Zhang ($IP = 10$) de depósitos de suelos pertenecientes al cuaternario y para distintas presiones de confinamiento medio.

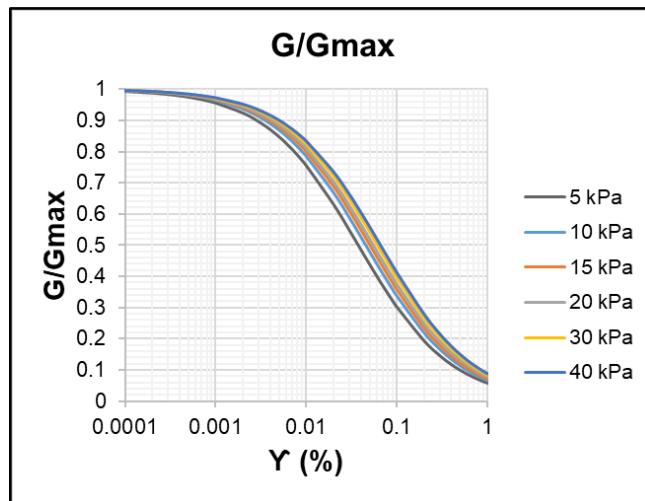


Figura N°8. Módulo de corte normalizado para un material con índice de plasticidad $IP = 10$ propuesto por Zhang (2005).

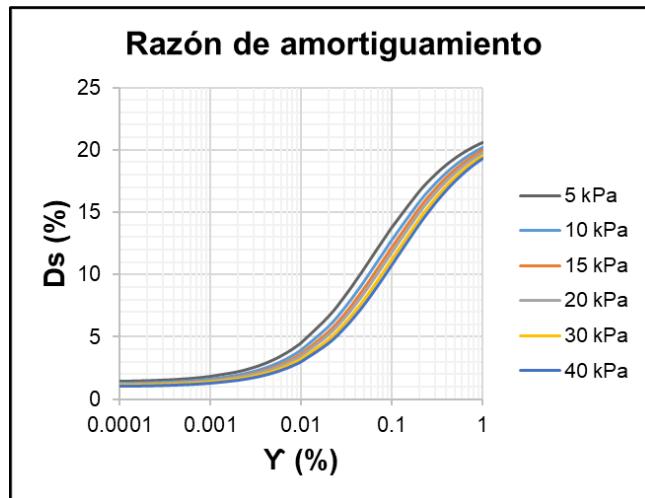


Figura N°9. Razón de amortiguamiento para un material con índice de plasticidad $IP = 10$ propuesto por Zhang (2005).

2.4 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO

Para la presente tesis se utilizaron métodos de exploración indirecta, principalmente los métodos sísmicos. Estos métodos producen pequeñas deformaciones cortantes en el suelo y pueden ser activos o pasivos.

Los métodos activos requieren de un agente externo generador de ondas sísmicas, de modo que produzcan una vibración al suelo mediante la propagación de ondas a través de este. Por otro lado, los métodos pasivos requieren de la vibración ambiental producida principalmente por ondas superficiales.

Los métodos activos que comprenden la presente tesis son:

2.4.1 Ensayo de refracción sísmica

El ensayo de refracción sísmica es empleado para determinar el perfil sísmico de ondas de compresión (ondas P). Este ensayo consiste en la medición de tiempos desde la generación de ondas sísmicas hasta la llegada al receptor (sensor).

Para la ejecución de este ensayo los geófonos (velocímetro de componente vertical) se instalan a lo largo de una línea de una determinada longitud. Estos geófonos son anclados al terreno y conectados a un adquisidor de datos. Adicionalmente, un cable trigger es conectado al adquisidor indicando el inicio de la grabación de datos cuando el agente externo provoque la generación de ondas sísmicas (Figura N°10).

Los golpes generados son aplicados a una distancia igual a la mitad del espaciamiento de los geófonos en cada extremo de la línea sísmica y un golpe en el centro de esta. El procesamiento de datos está basado en el principio de Huygens y la ley de Snell.

Los tiempos de llegada de la onda sísmica (ondas P) y las distancias de los geófonos para cada golpe son ploteadas en curvas llamadas “domocrónicas”. A partir de estas curvas se determina el espesor de los estratos y la velocidad de ondas P. Es importante indicar que el perfil sísmico Vp resultante del ensayo de refracción sísmica es bidimensional y se encuentra a lo largo de toda la línea sísmica donde se encuentran ubicados los geófonos.

La calidad de la información obtenida en campo del ensayo de refracción sísmica, independientemente de otros factores externos, dependerá de la longitud de la línea sísmica; es decir, una línea sísmica de mayor longitud tendrá una mayor profundidad de exploración que una línea de menor longitud.

La principal desventaja de este ensayo es que los valores determinados de velocidad de ondas Vp son crecientes; es decir, no es posible detectar estratos de suelos cuyo valor de Vp es menor al suprayacente a este.

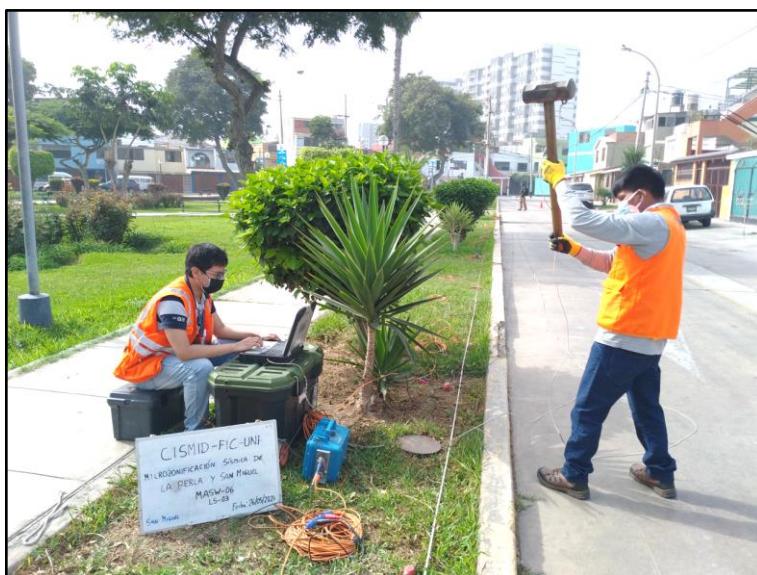


Figura N°10. Ensayo de Refracción sísmica realizado en el distrito de San Miguel.

2.4.2 Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)

Esta metodología fue propuesta por Park (1999) y consiste en la medición de ondas superficiales (Ondas Rayleigh) producto de una fuerte excitación del suelo

en puntos específicos. Estas mediciones son captadas por velocímetros uniaxiales (componente vertical) pasando la información a un adquisidor de datos (Figura N°11). Los sensores son ubicados sobre un eje a lo largo del terreno al igual que el ensayo de refracción sísmica. Generalmente un operador realiza golpes al suelo mediante una comba generando una excitación al suelo. Es importante indicar que los equipos utilizados para realizar el ensayo de refracción sísmica también pueden ser utilizado para el ensayo MASW. Sin embargo, la calidad de la información para el ensayo MASW, independientemente del ruido externo, dependerá la frecuencia de los geófonos; es decir, si se trabaja con geófonos de baja frecuencia, la calidad de los resultados será mucho mejor que con geófonos de alta frecuencia que presentan una menor resolución para definir la curva de dispersión. Los geófonos utilizados en el presente trabajo tienen una frecuencia de 4.5 Hz, lo suficiente para obtener perfiles de velocidad de onda de corte hasta 30 metros de profundidad.

En el ensayo MASW se aprovecha la propiedad dispersiva de las ondas Rayleigh y se genera una curva de dispersión que relaciona la velocidad de fase con su frecuencia correspondiente. Mediante un proceso de inversión se obtiene el perfil de sitio en función a la velocidad de onda de corte. Generalmente el ensayo es empleado para conocer el perfil de sitio hasta una profundidad de 30 metros. Es importante señalar que el perfil sísmico V_s es unidimensional y se ubica en el centro de la línea del ensayo MASW.

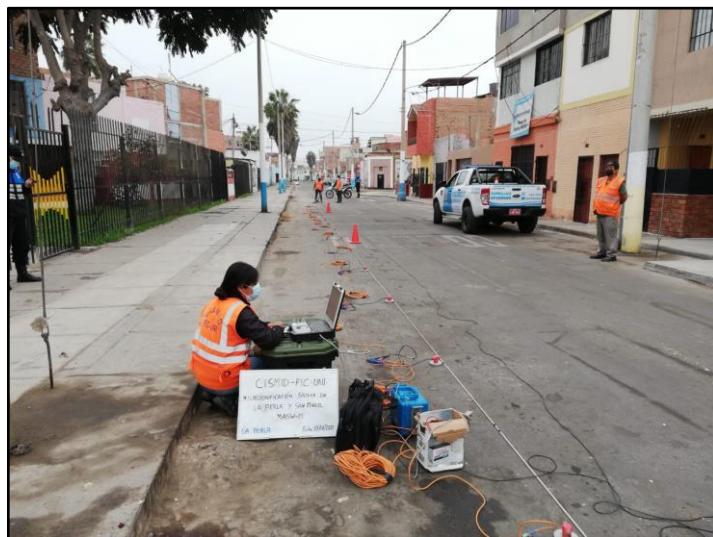


Figura N°11. Ensayo MASW realizado en el distrito de La Perla

Los métodos pasivos realizados para exploraciones indirectas del suelo fueron:

2.4.3 Medición puntual de microtremores

Los microtremores, microvibraciones, ruido ambiental o microtrepidaciones son ondas provenientes de actividades urbanas (tráfico, fábricas, etc.) las cuales presentan un intervalo de frecuencias de 0.01 a 30 Hz. Sin embargo, para las exploraciones geofísicas sólo interesa la banda de 0.1 a 10 Hz, ya que en esta banda parte de la energía se transmite como Ondas Rayleigh. La información obtenida permite determinar los parámetros elásticos de la superficie terrestre. Estas vibraciones ambientales son registradas por sensores, generalmente velocímetros triaxiales debido a su gran capacidad de captar pequeños movimientos de suelo (Figura N°12). Sin embargo, es posible medir aceleraciones cuando el ambiente presenta altas amplitudes para evitar la saturación de las velocidades (Montalva, 2019).



Figura N°12. Ensayo de medición puntual de microtremores realizado en el distrito de San Miguel.

Método de Nakamura

Para entender el método de Nakamura partimos del concepto de función de transferencia, la cual estima la amplificación o deamplificación de un parámetro (pudiendo ser aceleración, velocidad, movimiento, desplazamiento, etc.) con respecto a otro de su misma naturaleza. En este caso, es común emplear funciones de transferencia que relacionen la aceleración espectral del movimiento en la superficie de un depósito de suelo con respecto al movimiento en la roca profunda en todo el contenido de frecuencias.

Nakamura (2008) señala que la técnica de relaciones espectrales H/V fue inicialmente utilizada para la estimación de la función de transferencia del suelo mediante el registro de movimientos fuertes en Japón. Se considera que el movimiento horizontal es mayor al vertical en suelos blandos (Figura N°13); mientras que, para suelos rígidos estas componentes son similares. La aplicación de esta técnica es básicamente sobre las ondas Rayleigh de los registros sísmicos.

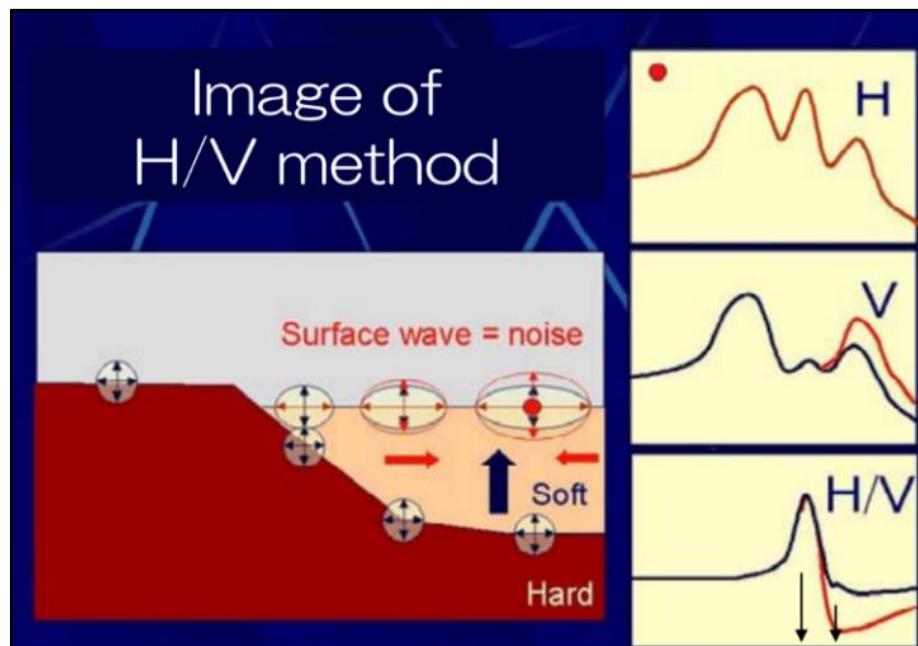


Figura N°13. Esquematización del método H/V para estimar la función de transferencia del suelo.
Elaborado por Nakamura (2008).

Debido a su fácil aplicabilidad, se utilizan registros de microtremores y mediante la técnica de Nakamura (1989) se obtiene un espectro H/V que representa en teoría la función de transferencia del depósito de suelo. El pico de la función correspondería al valor del periodo fundamental del suelo, como ejemplo se puede observar en la Figura N°14. Sin embargo, en muchos casos identificar su valor requiere de un juicio experto debido a que no siempre se puede visualizar con facilidad el pico de la amplificación máxima.

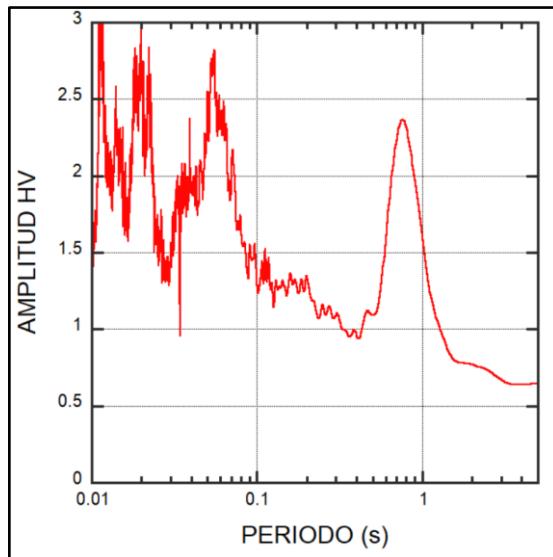


Figura N°14. Relaciones espectrales H/V para un sitio en el distrito de San Miguel.

2.4.4 Arreglos de microtremores

Los arreglos de microtremores permiten la caracterización de sitio a nivel profundo dependiendo de la extensión del ensayo. Este ensayo consiste en el registro de la vibración ambiental del suelo a través de sensores ubicados en los vértices y centro de un polígono regular (pudiendo ser triangular, pentagonal, etc.) circunscrito en una circunferencia en cuyo centro se encuentra ubicado el sitio de interés (Figura N°15). Para poder captar señales de onda con mayor longitud de onda (por ende, las más profundas), es necesario contar con mayor espaciamiento entre geófonos. Razón por la cual, la profundidad de exploración dependerá en gran medida de la extensión del radio de la circunferencia, pudiéndose realizar para 5m, 10m, 20m, 50m, etc. Mientras mayor es el radio de la circunferencia, entonces mayor será el nivel de profundidad explorada. Sin embargo, para captar altas frecuencias de onda se requiere de una excitación del suelo. Para lograr este propósito, se realizan arreglos lineales de 0.5 y 2 m de espaciamiento entre geófonos en donde el suelo debe ser excitado por agentes activos. La excitación del suelo puede ser lograda por personas saltando sobre la superficie del suelo.



Figura N°15. Ensayo de arreglos de microtremores.

El procesamiento en gabinete de los arreglos de microtremores comprende tres etapas principalmente: 1) determinación de la curva de dispersión (observada), que consiste en aprovechar la propiedad dispersiva de las ondas superficiales (Rayleigh) para relacionar mediante diversas metodologías la velocidad de fase y frecuencia de las ondas; 2) inversión de la curva de dispersión, que requiere de iteraciones para ajustar la curva de inversión teórica (obtenida por un perfil Vs) a la curva observada; y 3) comparar el espectro H/V teórico (obtenido en el perfil Vs definido) con el espectro H/V observado (obtenido por los registros) de manera que si presenta similitudes el proceso finaliza, sin embargo, si sucede lo contrario se debe volver a la etapa 1 o 2 hasta ajustar los espectros H/V.

Estimación del perfil sísmico profundo

Las ondas superficiales se caracterizan por tener un comportamiento dispersivo, lo que significa que sus propiedades tienen una dependencia de la frecuencia en medios semi-infinitos verticalmente heterogéneos (estratificados). La curva de dispersión relaciona la velocidad de fase de las ondas superficiales con el periodo asociado a dichas ondas. Entonces, un depósito de suelo va a estar caracterizado intrínsecamente por una curva de dispersión, que mediante un proceso de inversión se tiene como resultado el perfil sísmico del depósito de suelo.

Para estimar la curva de dispersión, es necesario contar con registros de vibraciones ambientales (microtremores) y/o de una excitación externa en el suelo correspondientes a arreglos geométricos de distintas dimensiones. Estos arreglos

pueden ser lineal o circular. Generalmente los registros utilizados para el procedimiento de cálculo de la curva de dispersión corresponden a las ondas Rayleigh debido a que son las únicas que presentan una componente vertical. Además, esta característica permite que puedan ser combinadas o confundidas con las ondas Love.

A continuación, se hará una breve descripción de los métodos utilizados para la estimación de la curva de dispersión:

a) Método de número de onda-frecuencia de alta resolución (F-k):

El método de número de onda-frecuencia de alta resolución (F-k) fue propuesto por Capon (1960) y hace uso de espectros de potencia para obtener los números de ondas para diferentes frecuencias, cuya definición se muestra en la Ecuación 14:

$$P'(\lambda, k) = \left[\sum_{j,l=1}^k \hat{q}_{jl}(\lambda) \exp[ik(x_j - x_l)] \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde λ es la frecuencia normalizada, k es el vector de número de onda, $\hat{q}_{jl}(\lambda)$ es la inversa de una matriz espectral, x_j y x_l son los vectores posición correspondientes a los sensores j y l .

b) Método de autocorrelación espacial (SPAC):

El método de autocorrelación espacial (SPAC) fue propuesto por Aki (1957) hace uso de coeficientes de autocorrelación espacial $\rho(r, \omega)$ entre diferentes pares de formas de onda filtradas por paso de banda registradas en el centro y en un punto de la circunferencia. Luego tomando el promedio azimutal de estos coeficientes de correlación, asumiendo ondas estacionarias en el tiempo y en el espacio, los coeficientes son determinados como se muestra en la Ecuación 15.

$$\rho(r, \omega) = J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right) \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde: r es la distancia de separación entre sensores, ω es la frecuencia circular, $c(\omega)$ es la velocidad de fase en la frecuencia ω y J_0 es la función de Bessel de orden cero.

A diferencia del método F-k, este método requiere que un conjunto de sensores sea ubicado en forma de circunferencia en cuyo centro se encuentre un sensor.

c) Método CCA:

El método CCA fue propuesto por Cho et al. (2004) y es una extensión del método de Henstridge (1979), que a su vez es una forma generalizada del método SPAC. Este método permite analizar una amplia gama de componentes de longitud de onda; en el caso especial en donde el número de onda es una función de valor único de frecuencia, la velocidad de fase $c(\omega)$ se determina de la siguiente manera:

$$c(\omega) = \frac{r \omega}{M^{-1}[G_0(\omega, r)/G_1(\omega, r)]} \quad \text{Ecuación 16}$$

En donde M^{-1} es la inversa de una función de razón espectral, G_0 y G_1 son densidades de espectros de potencia.

Por otro lado, una variante de esta metodología es el método nc-CCA propuesto por Tada et al. (2007) en donde se corrigen subestimaciones de las velocidades de fase debido a ruidos.

Los métodos mencionados anteriormente (f-k, SPAC, CCA, nc-CCA) permiten definir la curva de dispersión característica del depósito de suelo. Posteriormente es necesario realizar un proceso de inversión a la curva de dispersión para obtener el perfil de velocidades de onda de corte. En el presente trabajo se utilizó el método de algoritmos genéticos (GA), el cual necesita como input un modelo inicial que consiste en un rango de velocidades de onda de corte y espesores de cada estrato del modelo.

Las características mecánicas y dinámicas obtenidas de las exploraciones en campo nos permitirán realizar el análisis de propagación de ondas en el depósito de suelo. Este análisis permitirá cuantificar el movimiento en la superficie del suelo a partir del ingreso de un registro sísmico.

Dado que el área de estudio presenta una topografía llana, el análisis de propagación de ondas unidimensional nos permitirá tener una buena aproximación del movimiento en la superficie del suelo.

2.5 RESPUESTA UNIDIMENSIONAL DEL SUELO

El análisis de respuesta de sitio permite conocer el comportamiento del suelo frente a cargas dinámicas. En este análisis se considera el efecto de la propagación de las ondas desde la ruptura de la falla (fuente). Estas ondas se

transmiten por todo el material rocoso y se modifican debido a la dispersión de ondas, la atenuación anelástica y dispersión geométrica (Jia, J., 2017). A este proceso de propagación en el material rocoso se le denomina efectos de trayectoria. Posteriormente las ondas pasarán del material rocoso a un depósito de suelo, en donde las ondas presentarán cambios en su contenido de frecuencia hasta llegar a la superficie; a esta etapa se le denomina efectos de sitio. En este nivel, las ondas sísmicas entrarán en contacto con la cimentación de la estructura y la respuesta dinámica se verá reflejada principalmente en el espectro de respuesta; a este nivel se le denomina interacción suelo-estructura. Finalmente, la energía será transmitida a toda la estructura, razón por la cual, sus componentes deben estar diseñadas para que resistan determinadas cargas. La Figura N°16 muestra un esquema del “viaje” de las ondas sísmicas desde la ruptura de falla hasta las cargas sísmicas aplicadas en la estructura.

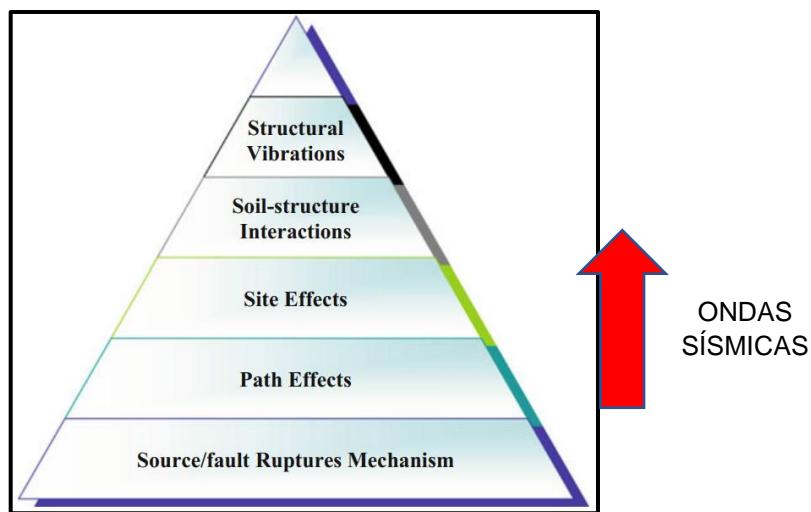


Figura N°16. “Viaje” de las ondas sísmicas

Nota. “Viaje” de las ondas sísmicas desde la ruptura de la falla hasta la aplicación de las cargas sísmicas en la estructura (Jia, J., 2017).

En este capítulo, se tratará principalmente los efectos de sitio; es decir, a un nivel donde las ondas sísmicas parten desde un material rocoso muy rígido y se transmiten por todo el depósito de suelo. En este análisis la propagación tiene una tendencia hacia una dirección vertical conforme se acerca a la superficie del depósito de suelo (Figura N°17). Además, se modifican sus principales parámetros sísmicos, tales como: contenido de frecuencias, aceleración máxima (PGA), espectros de respuesta, Intensidades de Arias, etc.

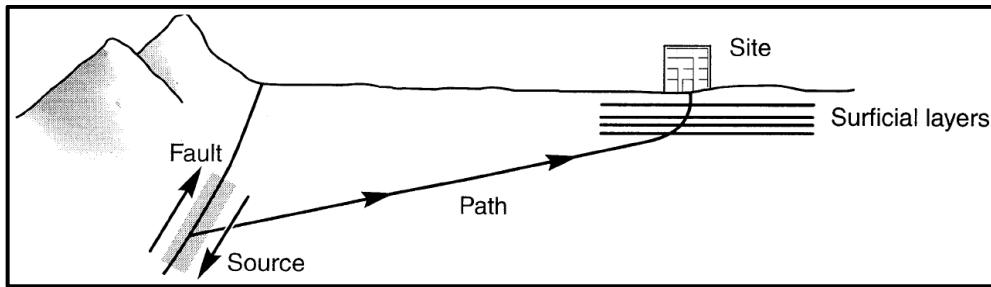


Figura N°17. Propagación de las ondas sísmicas desde la falla (Kramer, 1996).

Según Kramer (1996), los efectos locales de sitio están influenciados principalmente por los efectos topográficos del sitio, las características del movimiento de entrada, la geometría y propiedades de los materiales del depósito de suelo. Por otro lado, Sitharam et al (2018) señalan que la profundidad a la roca también es muy influyente en la respuesta sísmica del suelo. Por esta razón, los depósitos de suelo profundo como el conglomerado de Lima (grava mal gradada) presentan grandes picos en la relación espectral H/V de los microtremores para periodos largos cercanos a 1 segundo como señalan Quispe et al. (2019).

Dado que los efectos de sitio juegan un papel muy importante en la determinación de la respuesta sísmica del suelo, Sitharam et al (2018) presentan tres categorías que nos permiten estimar estos efectos: 1) métodos empíricos, 2) métodos experimentales y 3) análisis numéricos.

Métodos empíricos:

Están basados en la información de los registros de una gran variedad de sismos y correlacionan la amplificación sísmica con las características geológicas, velocidad de ondas de corte promedio de los primeros 30 metros (V_{s30}), número de golpes del SPT (N_{SPT}) del suelo, etc.

Métodos experimentales:

Están basados en la información obtenida de sensores mediante la medición de movimientos débiles, movimientos fuertes o microtremores, este último será tratado en el capítulo V.

Análisis numérico:

Consiste en la estimación de la respuesta del suelo mediante el modelamiento de los materiales que conforman el depósito de suelo. Dependiendo de la

complejidad del problema, se puede realizar análisis unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D). Además, independientemente de la dimensión del problema, se puede realizar el análisis con un enfoque lineal, lineal equivalente o no lineal. En este capítulo se tratará principalmente al análisis unidimensional siguiendo los enfoques lineal equivalente y no lineal.

La propagación de las ondas sísmicas (frente de ondas) que parten desde un material rocoso muy rígido, como se muestra en la Figura N°19, viajan a lo largo del depósito de suelo mediante la refracción y reflexión. Además, dependiendo de las características de los materiales (resistencia, impedancia, amortiguamiento, etc.), existirá una evidente diferencia entre los movimientos en el afloramiento rocoso (1), roca profunda (2) y superficie del suelo (3) como se muestra en la Figura N°18.

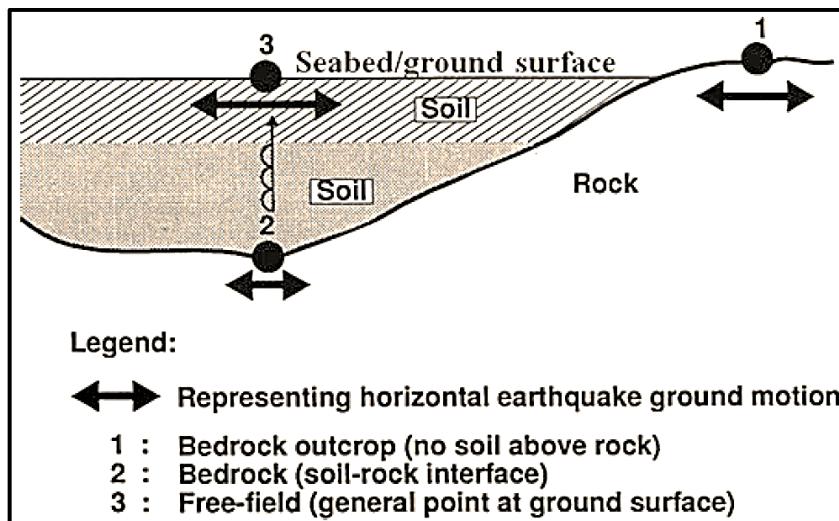


Figura N°18. Propagación de las ondas sísmicas desde la roca profunda. (Jia, J., 2017).

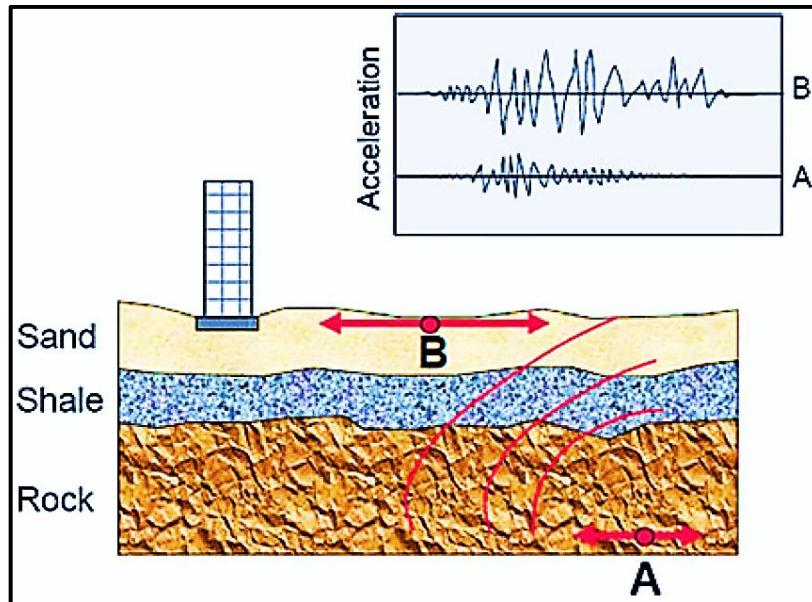


Figura N°19. Diferencia entre los movimientos en la roca y la superficie del suelo. Tomado de Jia, J. (2017).

Teniendo en cuenta que la respuesta sísmica del suelo está orientada a la estabilidad de estructuras ingenieriles, el movimiento que deberá ser analizado son principalmente las componentes horizontales (Kramer, 1996). Además, es importante señalar que para el análisis unidimensional se tiene que asumir algunos aspectos:

- ✓ Los estratos del depósito de suelo se encuentran en una posición horizontal.
- ✓ La respuesta del depósito de suelo es causada principalmente por la propagación vertical de las ondas SH desde la roca base.
- ✓ La superficie de la roca base y el depósito de suelo presentan una extensión infinita en la dirección horizontal.

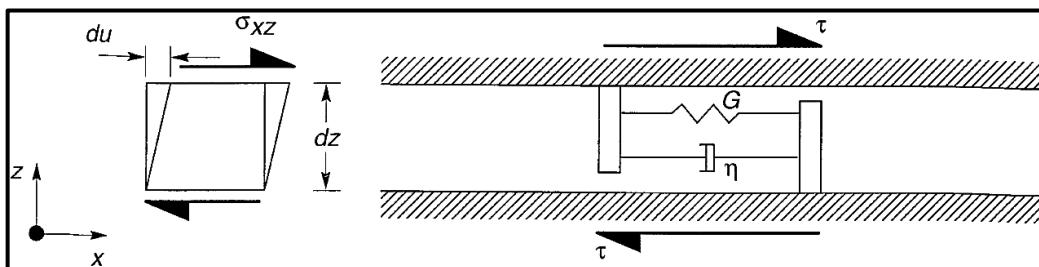


Figura N°20. Modelo de Kelvin-Voigt. (Kramer, 1996)

Considerando que en la propagación de las ondas sísmicas a través de un medio existe una disipación de energía elástica, el comportamiento del suelo es usualmente considerado como un material viscoelástico siguiendo el modelo de Kelvin-Voigt. En este modelo, un elemento es representado como se muestra en

la Figura N°20 y estando sometido a esfuerzos cortantes presenta una disipación de energía regida por la viscosidad (η). Considerando un sólido sometido a un esfuerzo cortante, el modelo de Kelvin-Voigt es expresado mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial\gamma}{\partial t} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, G es el módulo de corte, γ es la deformación cortante y $\eta = \frac{2G}{\omega}\xi$ es la viscosidad del material. Por otro lado, como se señaló líneas arriba, el análisis unidimensional del suelo estará gobernado principalmente por la propagación de las ondas S, las cuales están gobernadas por la siguiente ecuación:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde u es el desplazamiento horizontal, ρ es la densidad del material por donde viaja la onda y z es la dirección vertical (profundidad); entonces sabiendo que $\gamma = \frac{\partial u}{\partial z}$ y reemplazando la Ecuación 17 en la Ecuación 18, tenemos:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad \text{Ecuación 19}$$

La Ecuación 19 representa el comportamiento unidimensional de un elemento de suelo bajo las consideraciones señaladas. Sin embargo, asumiendo que los depósitos de suelos se encuentran estratificados horizontalmente; es decir, se encuentran distribuidos en capas a lo largo de la dirección vertical como se muestra en la Figura N°18. En ese sentido, es usual que los programas de cómputo realicen una discretización como se muestra en la Figura N°21, en donde cada estrato de suelo es representado por un sistema resorte-masa-amortiguador siguiendo el modelo de Kelvin-Voigt. Además, las interfaces son representadas por masas concentradas equivalentes a la mitad de cada estrato superior e inferior, de modo que los múltiples grados de libertad del modelo se expresen como una matriz gobernada por la ecuación de movimiento como se muestra en la Ecuación 20.

$$[M]\{\ddot{u}_{(t)}\} + [C]\{\dot{u}_{(t)}\} + [K]\{u_{(t)}\} = -[M]\{I\}\{\ddot{u}_g\} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde $[M]$ es la matriz masa, $[C]$ es la matriz de amortiguamiento viscoso, $[K]$ es la matriz de rigidez, $[I]$ es un vector unitario, $u_{(t)}$ es el desplazamiento relativo y \ddot{u}_g es la aceleración en la base de la columna de suelo.

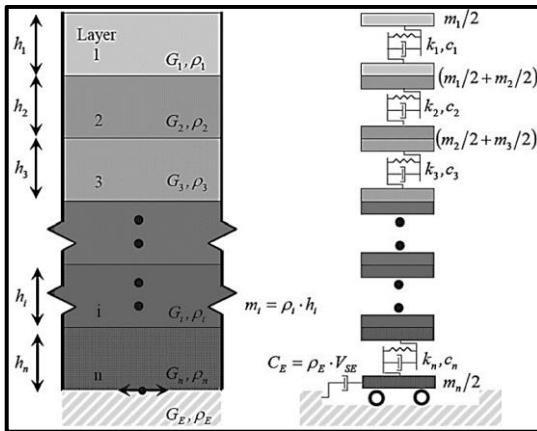


Figura N°21. Modelo de discretización del depósito de suelo estratificado horizontalmente (Jia, J., 2017).

El movimiento dinámico unidimensional de un elemento de suelo, bajo las condiciones asumidas, es gobernado por la Ecuación 19. Sin embargo, como se mencionó anteriormente es usual representar a un depósito de suelo mediante un sistema de masas concentradas gobernada por la Ecuación 20.

El análisis unidimensional de la respuesta dinámica del suelo puede ser desarrollado bajo tres enfoques: 1) el análisis lineal, 2) el análisis lineal-equivalente o 3) el análisis no lineal. El análisis lineal estima el movimiento del suelo mediante las funciones de transferencias que relacionan los parámetros de respuesta tales como aceleración, velocidad, desplazamiento, esfuerzos y deformaciones cortantes del suelo con respecto a un movimiento de entrada en un material como puede ser la roca profunda. En este enfoque se asume que el suelo presenta un comportamiento lineal-elástico y que sus parámetros dinámicos no se degradan para cualquier nivel de deformación. El presente trabajo evaluará la respuesta sísmica del suelo bajo los enfoques: el análisis lineal equivalente y el análisis no lineal.

2.5.1 Análisis lineal equivalente

Dado que el suelo presenta un comportamiento no lineal, el análisis lineal es modificado (análisis lineal equivalente) de tal manera que aproxime a la no linealidad del suelo en donde cada estrato de suelo es representado por valores de módulo de corte y razón de amortiguamiento. Además, se evalúa la compatibilidad con las deformaciones cortantes de acuerdo con las curvas de degradación de las propiedades dinámicas (módulo de corte y razón de amortiguamiento) mediante iteraciones (Figura N°22). Este análisis se desarrolla en el dominio de las frecuencias.

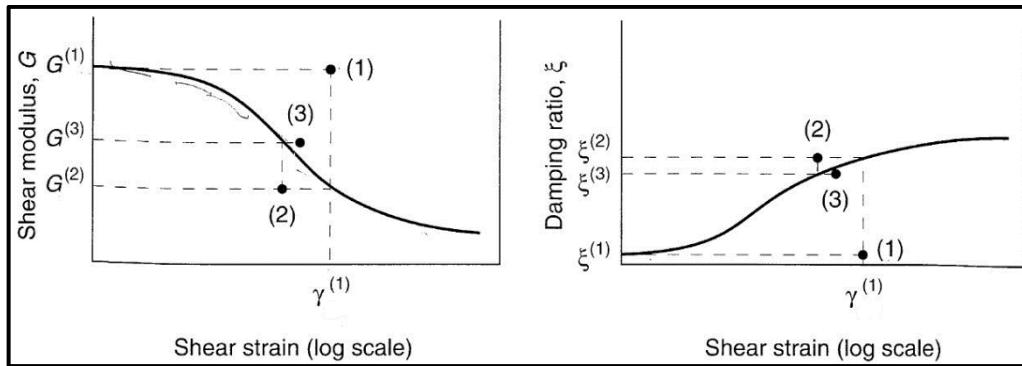


Figura N°22. Proceso iterativo del análisis lineal equivalente. (Kramer, 1996).

2.5.2 Análisis no lineal

El análisis no lineal del suelo realiza una mejor aproximación al comportamiento real del suelo frente a cargas cíclicas. Consiste en la integración numérica en el dominio del tiempo, generalmente los programas de cómputo como DEEPSOIL utilizan el método de Newmark β (implícito) o el método de Heun (explícito) para el desarrollo de las ecuaciones de movimiento.

La Tabla N°6 muestra a manera de resumen los diferentes métodos de análisis y modelos del suelo que se utilizan para el análisis de propagación de ondas.

Tabla N°6. Análisis de la respuesta del suelo desde distintos enfoques. Adaptado del Manual de DEEPSOIL V7 (2020)

Método de análisis	Modelo del suelo	Formulación de recarga/descarga histérica
Lineal	En el dominio del tiempo y frecuencias	- -
Lineal equivalente	Dominio de las frecuencias	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo general cuadrático/hiperbólico (GQ/H) - Modelo Kondner – Zelasko Modificado (MKZ) - Yee et al. (2013) - Etc.
No lineal	Dominio del tiempo	<ul style="list-style-type: none"> - No-masing - Masing

2.5.3 Modelos no lineales del suelo

El comportamiento histerético del suelo frente a cargas cíclicas ha sido estudiado por diferentes investigadores y la mayoría son caracterizados por una curva representativa llamada curva backbone o curva principal. Los modelos no lineales se basan en la curva backbone y presentan una serie de reglas que gobiernan el comportamiento de carga y descarga, las cuales se pueden resumir en 4 reglas:

1. Para cargas iniciales, el comportamiento del suelo sigue la curva backbone.
2. Las curvas de carga y recarga tienen la misma forma que la curva backbone pero es ampliado por un factor de 2 (con el origen desplazado al punto de inversión de la carga). Estas dos primeras reglas son denominadas reglas de Masing (1926), sin embargo, no son suficientes para describir la respuesta del suelo frente a cargas cíclicas generalizadas (Kramer, 1996).
3. Si la curva de descarga o recarga excede la máxima deformación anterior e intersecta a la curva backbone, seguirá la curva backbone hasta la siguiente inversión de esfuerzo.
4. Si una curva de descarga o recarga cruza una curva de descarga y recarga del ciclo anterior, la curva esfuerzo cortante-deformación sigue la curva del ciclo anterior.

Estas 4 reglas son llamadas reglas de Masing Extendidas y su dinámica se observa en la Figura N°23.

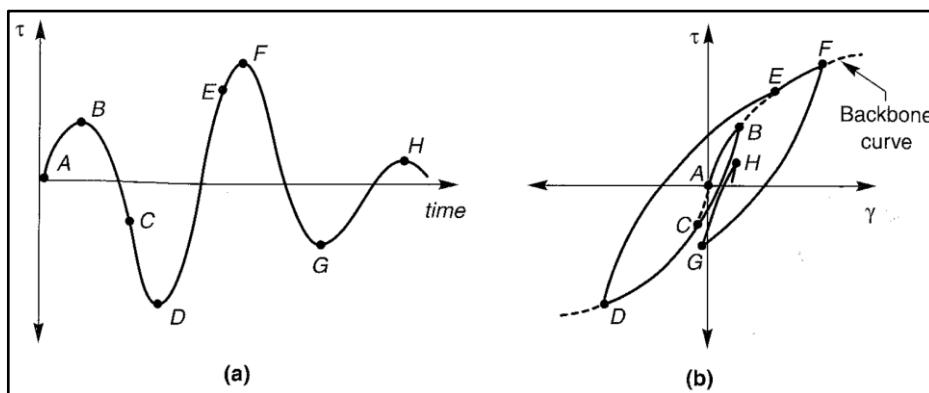


Figura N°23. Reglas de Masing Extendidas. (Kramer, 1996)

Actualmente, la mayoría de los modelos no lineales del suelo se basan en las reglas de Masing y se encuentran implementadas en programas de cómputo como SHAKE o DEEPSOIL. A continuación, se describirán los modelos más recientes y usados en la actualidad:

Modelo Kondner – Zelasko Modificado (MKZ)

El modelo de Kondner – Zelasko Modificado (MKZ) fue desarrollado por Matasovic (1993) en donde la curva backbone es representada mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde: G_0 es módulo de corte inicial, γ_r es la deformación cortante de referencia, β y s son parámetros del modelo; la deformación de referencia es determinada según la Ecuación 22:

$$\gamma_r = \frac{\gamma_{mo}}{G_{mo}} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde: γ_{mo} es definido como la ordenada γ correspondiente aproximadamente al límite superior de este rango de deformación cortante dominante y G_{mo} es la tangente inicial del módulo cortante.

Groholski (2016) señala que el modelo MKZ presenta una buena aproximación para deformaciones relativamente cortas. Sin embargo, para grandes deformaciones el modelo puede subestimar o sobreestimar el cálculo de los esfuerzos cortantes (Figura N°24).

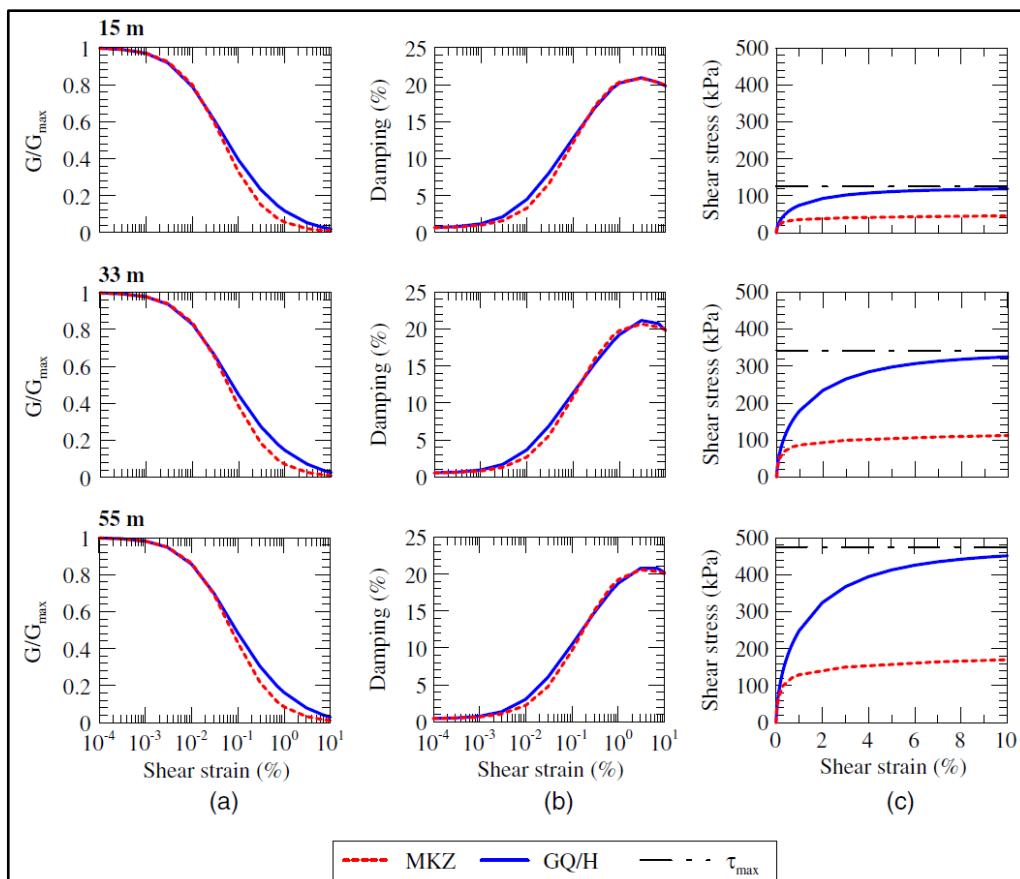


Figura N°24. Comparación de los métodos MKZ y GQ/H. (Groholski, 2016).

Modelo General Cuadrático/Hiperbólico (GQ/H)

Para suprimir la limitante del modelo MKZ, Groholski (2016) propone el modelo General Cuadrático/Hiperbólico (GQ/H) donde la estimación de los esfuerzos cortantes se encuentra limitada al parámetro “resistencia cortante máxima del suelo”. Además, presenta una buena estimación no lineal para todo el rango de deformaciones de los materiales sometidos a cargas cíclicas. La expresión que describe la curva backbone siguiendo el modelo GQ/H se muestra en la Ecuación 23.

$$\tau = \tau_{max} \left[\frac{1}{2\theta_\tau} \left\{ 1 + (\gamma/\gamma_r) - \sqrt{[1 + (\gamma/\gamma_r)]^2 - 4\theta_\tau(\gamma/\gamma_r)} \right\} \right] \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde τ_{max} es la resistencia cortante máxima en la falla, γ_r es la deformación relativa y θ_τ es un parámetro cuyo valor debe ser menor o igual a 1 y se determina con la Ecuación 24.

$$\theta_\tau = \theta_1 + \theta_2 \frac{\theta_4 \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^{\theta_5}}{\theta_3^{\theta_5} + \theta_4 \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^{\theta_5}} \leq 1 \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 y θ_5 son constantes de ajuste de curvas elegidas para proporcionar el mejor ajuste al módulo de corte normalizado en un rango de deformación definido.

Factores de reducción

Teniendo en cuenta que frente a un evento sísmico el suelo no presentará un comportamiento uniforme entonces las reglas de Masing deberán ser modificadas para obtener una respuesta más realista del suelo frente a solicitudes sísmicas. La presente tesis utiliza los factores de reducción de Phillips y Hashash (2009) que ajustan la reducción del módulo de corte y la curva de amortiguamiento; la Ecuación 25 presenta los factores de reducción:

$$F(\gamma_m) = P_1 - P_2 (1 - G(\gamma_m)/G_0)^{P_3} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde γ_m es la deformación cortante máxima en un tiempo determinado, $G(\gamma_m)$ es el módulo cortante en la deformación γ_m , P_1 , P_2 y P_3 son los parámetros de ajuste.

CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS

Debido a que los distritos de La Perla y San Miguel pertenecen a la ciudad de Lima que se ubica en una zona altamente sísmica, es importante conocer la respuesta del suelo frente a eventos de gran magnitud. La ciudad de Lima se encuentra frente a un acoplamiento sísmico que en algún momento generará un evento de magnitud 8.8 Mw (Villegas, 2016).

Para comprender el movimiento sísmico del suelo es necesario conocer a detalle las características de los materiales que componen el depósito de suelo. Para tener un mejor panorama, partimos de las características geológicas de la zona de estudio, en donde los estudios del INGEMMET (1992) señalan que estos depósitos de suelos fueron formados principalmente por material acarreado por el río Rímac en el cuaternario. Sin embargo, debido a factores meteorológicos, estos materiales depositados a lo largo de millones de años van a presentar distintas características físicas. Es por esta razón que se debe realizar un estudio geotécnico que permita distinguir las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que conforman los depósitos de suelo y como estos se distribuyen en toda la zona de estudio.

3.1 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

El área de estudio se encuentra en la margen izquierda del río Rímac, el cual tuvo gran influencia en la geoforma y litoestratigrafía que presentan los distritos de La Perla y San Miguel.

3.1.1 Geomorfología

En el aspecto regional constituye las siguientes unidades geomorfológicas:

Cono aluvial del río Rímac

Originalmente presentaba depresiones en el terreno (debido a la acción del agua por parte del río). Sin embargo, estas fueron rellenándose en el proceso de urbanización de la ciudad de Lima hasta presentar un relieve plano ondulado. Está conformado por los depósitos aluviales acarreados por el río.

Acantilados

Su extensión está comprendida entre los distritos de La Perla y Chorrillos. Fueron formados por el socavamiento y erosión ocasionado por las olas del mar del Océano Pacífico, llegando a tener una gran verticalidad. Sin embargo, en algunos

casos se presentaron depresiones que fueron rellenadas en su mayoría por material residual de obras civiles. Está conformado por depósitos aluviales y materiales de relleno en ciertas zonas.

Playas

Se encuentran en el borde litoral y fueron formadas por la acumulación de arenas acarreadas por corrientes litorales y por deriva litoral. Originalmente los acantilados limitaban directamente con el mar, sin embargo, con la finalidad de “ganar terreno al mar” se depositó material de desmonte (principalmente del proyecto Vía Expresa) en el pie de los acantilados.

En el aspecto local, el área de estudio presenta las mismas geoformas que el marco geológico regional. Sin embargo, existen características particulares en cada una de ellas que se detallarán a continuación:

- La llanura aluvial presenta un relieve más plano con respecto a las áreas adyacentes, presenta una pendiente promedio de 0.6%. Esta zona se encuentra totalmente trastocada por el hombre en su superficie, incluso se encuentran zonas turísticas como El Parque de las Leyendas y la presencia de huacas.
- Los acantilados tienen inicio en el distrito de La Perla y su altura va incrementando conforme avanza hacia el sur, estos han sido trastocados para la construcción de vías, especialmente la vía conocida como Circuito de playas de la Costa Verde. Además, se cubrió con vegetación y mallas para que ayuden a la estabilidad de los taludes.
- Las playas están conformadas principalmente por material antropogénico, presenta mayor área en el distrito de San Miguel, donde se han construido vías, puentes peatonales y algunos centros recreacionales como parte del proyecto Costa Verde.

La distribución geomorfológica del área de estudio mencionada anteriormente se puede visualizar en el ANEXO B-3.

3.1.2 Litoestratigrafía

En el aspecto regional, el área de estudio está constituido por los siguientes depósitos cuaternarios:

Depósitos aluviales recientes (Qh-al)

Considerados también como depósitos fluvioaluviales. Se encuentran en el lecho actual del río Rímac, son muy pedregosos, están compuestos principalmente por cantos y gravas subredondeadas con matriz arenosa en algunos casos.

Depósitos marinos recientes (Qh-m)

Se encuentran a lo largo del borde litoral (playas) y está conformado por arenas, limos y cantos retrabajados producto de la erosión y disgregación de las rocas de los acantilados; así como de los materiales acarreados por el río Rímac al océano.

Depósitos aluviales pleistocénicos (Qp-al)

Su origen está relacionado a las divagaciones y cambios de cursos periódicos que ha sufrido el río Rímac desde fines del Terciario Superior y comienzos del Pleistoceno, en que el río tenía un gran poder erosivo, hasta el Holoceno en que disminuye su poder de erosión. Este proceso dejó a su paso un apilamiento de material acarreado, que se le conoce como el antiguo cono aluvial del río Rímac. Este colchón aluviónico está conformado por una mezcla heterogénea de gravas, cantos y bolos redondeado y subredondeados, teniendo como matriz limos arcillosos, arenas limosas en porcentajes variables. Todos estos materiales se encuentran intercalados formando paquetes de grosor considerables como se aprecia en los acantilados. El espesor del conglomerado de Lima es desconocido, los estudios geofísicos demuestran que sobrepasa los 400 metros de grosor (INGEMMET, 1992), además se ha demostrado que material aluvial pleistocénico se encuentra incluso por debajo de los depósitos marinos (Concha, 1958). Actualmente se encuentra completamente trastocada por el hombre, por esta razón se pueden encontrar pequeños espesores de relleno en su superficie.

Rellenos antropogénicos

Se encuentran al pie de los acantilados y está conformado por material suelto residual de obras civiles en la ciudad, encontrándose bloques de roca de diferentes tamaños, gravillas, bloques de concreto, ladrillos, etc. en condición suelta.

En el ámbito local, el área de estudio conserva las mismas unidades litológicas (excepto los depósitos aluviales recientes). Sin embargo, se ha observado que el material gravoso de los depósitos aluviales pleistocénicos (Qp-al) va perdiendo

potencia cuando va hacia el nor-oeste, encontrándose en su superficie depósitos de arena y arcilla (La Perla); esto se debe a que la velocidad del caudal del río Rímac disminuyó en el Holoceno y depositó estos materiales en la superficie.

La distribución litológica del área de estudio mencionada anteriormente se puede visualizar en los mapas de Geología Regional y Geología Local que se encuentran en los ANEXOS B-1 y B-2 respectivamente.

3.2 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Los materiales que conforman el suelo de los distritos de La Perla y San Miguel están compuestos por material aluvial cuaternario acarreado por el río Rímac. En las capas superficiales se pueden encontrar materiales arenosos limosos; mientras que en la parte profunda se encuentra la grava aluvial, un material muy competente para cimentar estructuras que presentan grandes cargas. En este capítulo se hará mención a una serie de estudios recopilados, los cuales serán de gran importancia para la caracterización física y mecánica de los materiales. Posteriormente, la caracterización de estos materiales serán la base para desarrollar modelos de perfiles sísmicos en el área de estudio.

3.2.1 Datos geotécnicos recopilados

Dentro de los estudios recopilados de diversos proyectos realizados en el área de estudios se encuentran las exploraciones directas como calicatas que van desde los 2 hasta los 44 metros de profundidad, ensayos de penetración estándar (SPT) que llegan hasta 7.5 metros de profundidad, pozos que llegan hasta 146 metros y en donde se ha encontrado nivel freático a los 50 metros aproximadamente.

Las Tablas N°7 y N°8 muestran un resumen de la cantidad de ensayos recopilados en el presente estudio. Además, en las Tablas N°19, 20, 21, 22, 23 y 24 del ANEXO A-2 se muestran las características de los materiales encontrados a un mayor detalle y un mapa de ubicación de los sondajes recopilados en el ANEXO C-1.

Tabla N°7. Cantidad de exploraciones geotécnicas recopiladas en el distrito de La Perla

La Perla		
Item	Descripción de ensayo	Cantidad
1	Calicatas	27
2	Ensayos de penetración estándar (SPT)	8
3	Pozos	2
4	Ensayos de penetración dinámica ligera (DPL)	6
5	Densidad del suelo	4
6	Ensayos de resistencia al corte	5

Tabla N°8. Cantidad de exploraciones geotécnicas recopiladas en el distrito de San Miguel.

San Miguel		
Item	Descripción de ensayo	Cantidad
1	Calicatas	75
2	Pozos	3
3	Densidad del suelo	5
4	Ensayos de resistencia al corte	7

Debido a que en los capítulos subsiguientes se estimarán perfiles sísmicos profundos, es necesario determinar la profundidad a la que se encuentra el nivel freático. La Figura N°25 muestra la morfología del nivel freático en algunos distritos de Lima y Callao (Soto, 2017); en base a esta información se consideró que el nivel freático en el área de estudio se encuentra aproximadamente entre los 40 a 50 metros de profundidad.

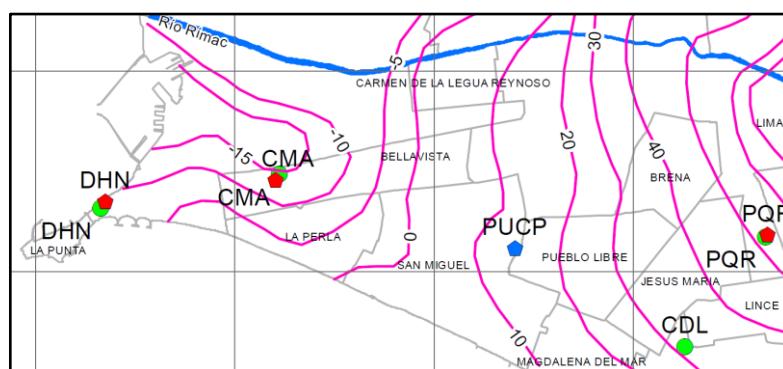


Figura N°25. Morfología del nivel freático en algunos distritos de Lima y Callao. Tomado de Soto (2016)

Para comprender la variabilidad de los tipos de suelo encontrados en el área de estudio se mostrarán 2 sondajes de 7.5 y 15 metros de profundidad realizadas en los distritos de La Perla y San Miguel respectivamente, cuyas ubicaciones se muestran en la Figura N°26.

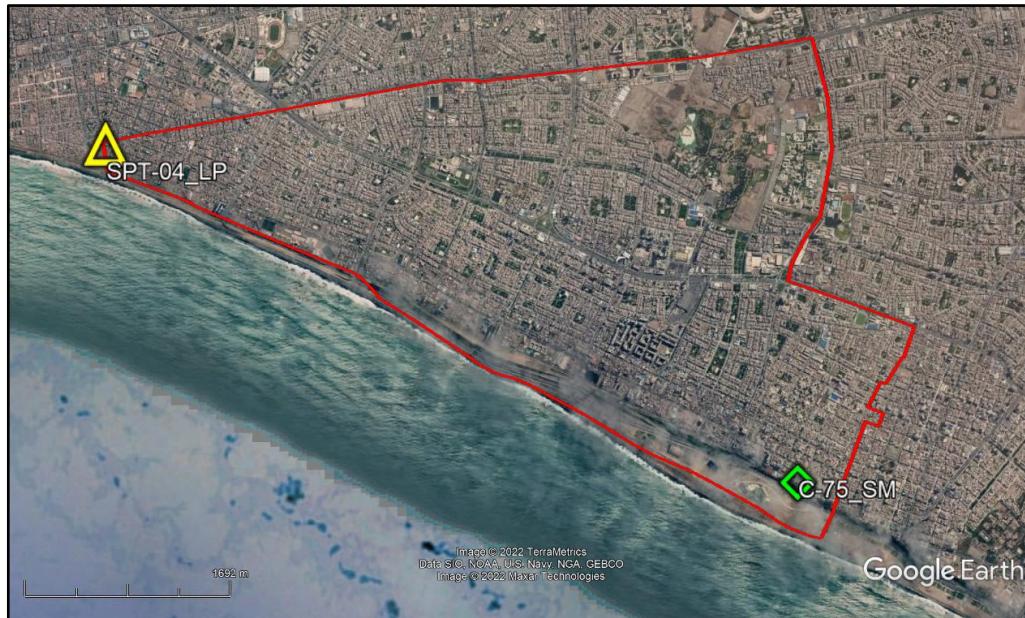


Figura N°26. Sondajes analizados para verificar la variabilidad de los tipos de suelos en el área de estudio.

La Figura N°27 muestra el perfil estratigráfico del sondaje SPT-04_LP en donde se muestra que el material fino-arenoso es predominante en los primeros metros de la superficie del suelo en el distrito de La Perla. Además, en los pozos recopilados esta información puede ser verificada y este material puede encontrarse incluso a mayor profundidad. Para estimar esta profundidad en algunos puntos del área de estudio, se utilizará métodos geofísicos que miden la vibración ambiental del suelo (microtremores) que se tratará con mayor detalle en el Capítulo V. Por otro lado, la Figura N°28 muestra el perfil estratigráfico del sondaje C-75_SM en donde predomina el material gravoso a pocos metros de la superficie en el distrito de San Miguel. Basándonos en la geología, podemos deducir que la grava se encuentra a mayor profundidad en el distrito de La Perla, en donde superficialmente se puede encontrar material fino-arenoso.

Profundidad (m)	Espesor del estrato (m)	Muestra obtenida	Clasificación SUCS	Simbología Gráfica	Resultados de campo		Descripción
					H. N. %	D. N. g/cm³	
0.0	0.15	S/M	-		-	-	Losa de concreto.
0.5	0.85	S/M	R		-	-	Relleno, arcilla limosa con restos de ladrillo, humeda, marrón.
1.0	0.50	M-1	ML		19.39	-	Limo semiduro, humedad media blanco, humo con gravillas aisladas, 32.95% arena, 2.49% grava.
1.5	0.50	M-2	Pt		34.89	-	Turba intercalada con lentes de arcilla, blanda, negra, humedad, 5% arena.
2.0	1.00	M-3	ML		19.73	-	Limo medio, humedad, media, amarillo, oxido con horizontes negruscos y lentes de arena limosa 11.97% arena.
2.5	1.00	M-4	ML		21.66	-	Limo medianamente plástico, humedad media, amarillento, oxido con horizontes negruscos, 5.62% arena.
3.0	0.30	M-5	ML		21.61	-	Limo duro, humedo, gris oscuro con trazas negruscas.
3.5	0.20	M-6	SM		8.33	-	Arena fina limosa medianamente densa gris oscuro, ligera humedad con micas muy aisladas, 29.23% finos.
4.0	0.50	S/M	ML		-	-	Limo, duro, humedo, gris oscuro con trazas negruscas.
4.5	1.35	M-7	CL		28.68	-	Arcilla blanda, humeda, gris oscuro con puntos negruscos, 6.89% arena.
5.0	0.15	M-8	ML		28.57	-	Limo semiduro, humedo, gris con amarillento, 27.92% arena.
5.5	0.50	S/M	CL		-	-	Arcilla semidura, humeda, gris oscuro con puntos negros.
6.0	0.50	M-9	SM		21.55	-	Arena limosa, muy densa, humeda con gravas aisladas TM=1" gris con manchas amarillentas, contacto con grava, rechazo, 78.84% arena.
6.5							
7.0							
7.5							

Figura N°27. Perfil estratigráfico del sondaje SPT-04_LP ubicada en el distrito de La Perla. Tomado del CISMID-FIC-UNI (2016)

Profund. (m)	Muestra	Símbolo	DESCRIPCION	SUCS
			Relleno. Tierra de jardín. Arcilla Límosa, de plasticidad baja, medianamente compacta, húmeda, marrón, con presencia de restos de ladrillo y raíces delgadas.	
1.00	□		Relleno. Limo arenoso arcilloso, de plasticidad baja, medianamente compacto, húmedo, marrón, con presencia de restos de ladrillo y gravas redondeadas alisadas de 3" de tamaño máximo.	
2.00	□		Suelo Natural, Arena fina, límosa, mal graduada, medianamente densa, húmeda, marrón claro.	SP-SM
3.00	□		Grava arenosa, mal graduada, medianamente densa, húmeda, plomo claro, con gravas y bolones redondeados de 8 pulg de tamaño máximo.	GP
4.00	□		Grava arenosa, ligeramente límosa, mal graduada, medianamente densa a densa, húmeda, marrón claro, con piedras y bolones redondeados de 8 pulg de tamaño máximo. Presencia de pequeños bolsones de limo arcilloso.	GP-GM
5.00	□		Arena fina gravosa, mal graduada, medianamente densa, húmeda, plomo claro, con gravas y bolones redondeados de 8 pulg de tamaño máximo.	SP
6.00	□		Grava arenosa, mal graduada, densa, húmeda, plomo, con gravas y bolones redondeados de 8 pulg de tamaño máximo.	GP
6.00	□		Grava arenosa, ligeramente límosa, mal graduada, suelta a medianamente densa, húmeda, marrón plomizo oscuro, con gravas y bolones redondeados de 7 pulg de tamaño máximo y presencia de óxidos.	GP
7.00	□		Grava arenosa, ligeramente límosa, mal graduada, suelta, húmeda, marrón oscuro a negro, con piedras y bolones redondeados de 6 pulg de tamaño máximo. Presencia de finos no plásticos y óxidos.	GP-GM
7.00	□		Grava arenosa, límosa, mal graduada, medianamente densa, húmeda, marrón claro, con piedras y bolones redondeados de 6 pulg de tamaño máximo. Presencia de finos de plasticidad baja.	GP-GM

Figura N°28. Perfil estratigráfico de la calicata recopilada C-75_SM ubicada en el distrito de San Miguel. Tomado del Convenio UNI-FONDES (2021)

3.2.2 Tipos de suelos

Los trabajos de microzonificación del CISMID-FIC-UNI realizados en el distrito de La Perla (2016) y San Miguel (2015) determinaron zonas de tipos de suelos a 1 (Figura N°29) y 2.5 metros de profundidad los cuales se muestran en los ANEXOS C-2 y C-3. En estos trabajos se pueden observar que la grava aluvial proveniente del río Rímac tiende a ser más superficial en la zona nor-este del área de estudio; por esta razón en los próximos capítulos se tratará de estimar y comparar el movimiento sísmico a lo largo de esta zona de variabilidad de materiales.



Figura N°29. Mapa de distribución de los tipos de suelos encontrados a 1 metro de profundidad.
Tomado del CISMID-FIC-UNI (2015) y CISMID-FIC-UNI (2016).

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

4.1 INTRODUCCIÓN

La sismicidad del Perú se encuentra gobernada por el mecanismo de subducción y por sismos producto de deformaciones corticales en la corteza continental. El mecanismo de subducción de la placa Nazca debajo de la placa Sudamericana comprende a los *sismos de interfase*, cuyo origen se encuentra a nivel de la colisión entre placas Nazca y Sudamericana; y a los *sismos de intraplaca*, que ocurren dentro de la Placa Nazca, pero debajo de la placa Sudamericana, lo que significa que estos últimos son más profundos. Los *sismos de origen continental* están asociados al sistema de fallas a nivel de la corteza continental producto de la compresión de la placa Sudamericana.

El trabajo de Roncal (2017) recopila una gran cantidad de información acerca de las características sismotectónicas del Perú y propone modelos de fuentes sismogénicas a nivel regional para cada mecanismo, el cual será tomado como base para la elaboración del estudio de peligro sísmico del presente trabajo.

4.2 EVALUACIÓN DE PELIGRO SÍSMICO

El presente trabajo desarrolla el análisis de peligro sísmico probabilístico debido a que involucra a todos los eventos sísmicos de la región y además incluye las incertidumbres mencionadas anteriormente.

4.2.1 Zonificación tectónica del Perú

El Perú presenta diversos rasgos tectónicos cuya dinámica está fuertemente influenciada al proceso de subducción de la placa de Nazca debajo de la placa sudamericana (Figura N°30) los procesos orogénicos que se desarrollaron debido a esta interacción dieron origen a los elementos tectónicos de la región. A continuación, se menciona a los principales rasgos tectónicos:

- ✓ **Fosa de Perú-Chile:** Es una fosa oceánica que se encuentra paralelo al litoral costero, delinea el contacto entre las placas de Nazca y sudamericana. Llega hasta una profundidad de 8000 m.
- ✓ **Cordillera de los Andes:** Se encuentra en la zona occidental de Sudamérica, fue formado por la convergencia entre la placa de Nazca y la placa sudamericana.
- ✓ **Dorsal de Nazca:** Es una cordillera que se ubica en el fondo del Océano Pacífico que va de dirección suroeste-noreste y perpendicular a la línea de la

fosa de Perú-Chile, se encuentra en proceso de subducción debajo de la placa sudamericana.

- ✓ **Cadena volcánica del sur del Perú:** Se encuentra en la Cordillera Occidental y presenta una extensión aproximada de 500 Km. Está conformada por más de 400 volcanes, de los cuales, 16 son activos.
- ✓ **Sistemas de fallas:** Se encuentran distribuidos en la corteza continental y fueron formados como efecto secundario del proceso de subducción de la placa de Nazca debajo de la placa sudamericana.

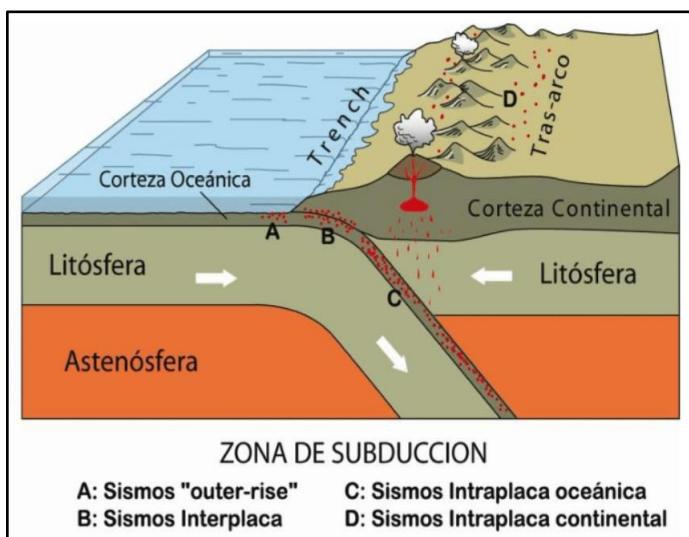


Figura N°30. Mecanismos que gobiernan la actividad sísmica del Perú. Tomado de Astroza et al. (2016)

4.2.2 Sismicidad histórica

La información de la sismicidad del Perú se remonta a los años 1513 (Silgado, 1978). Los primeros reportes fueron plasmados en las crónicas de los religiosos o en las narraciones de los viajeros ilustres que visitaron la región, enfocándose principalmente en los daños causados por estos eventos sísmicos. La calidad de estos datos está relacionada a la distribución y densidad de la población en las regiones afectadas por estos eventos. Se estima que hasta fines del siglo XIX se habrían producido más de 2500 sismos en el Perú (Toribio, 1904).

La recopilación de los sismos elaborado por Silgado (1978), indican que Lima ha sido azotada por 15 sismos, dejando muchas veces a la ciudad destruida y causando pérdidas de vidas humanas. El sismo de 1746 destruyó completamente la ciudad de Lima y generó un tsunami con olas de hasta 20 m de altura.

4.2.3 Sismicidad instrumental

La sismicidad instrumental en el Perú tiene sus inicios en el siglo XX, sin embargo, los primeros registros sísmicos muestran una data incompleta o de baja calidad. Fue entonces que a partir del año 1963 que la calidad de la data sísmica mejoró considerablemente gracias a la instalación de la red sismográfica mundial. Sin embargo, a pesar de contar con una sismicidad instrumental, la información obtenida no es suficiente para estimar el peligro sísmico, razón por la cual, es necesario complementarla con la data pre-instrumental explicada anteriormente. Esta data fue incorporada en el catálogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú (2001).

En la actualidad existen muchos catálogos sísmicos pertenecientes a las siguientes instituciones: Instituto Geofísico del Perú (IGP), National Earthquake Information Center (NEIC), International Seismological Center (ISC), United States Geological Survey (USGS), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y el Global Centroid Moment Tensor (Global CMT).

4.2.4 Geometría de las fuentes sismogénicas

Para la identificación y caracterización de las fuentes sismogénicas se tomó como referencia el trabajo de Roncal (2017), que utilizó una data sísmica depurada y actualizada hasta el año 2016. Roncal definió 29 fuentes sismogénicas en base a la distribución espacial de los epicentros y las características tectónicas de la región, estas fueron catalogadas en 2 grupos:

- ✓ **Fuentes de subducción (20):** Su dinámica está asociada al proceso de subducción de la placa Nazca debajo de la placa Sudamericana. Se han distinguido dos mecanismos que gobiernan la sismicidad de estas fuentes, ellos son: los mecanismos de interfase y de intraplaca.
- ✓ **Fuentes continentales (9):** Están asociadas a las deformaciones corticales, principalmente a los sistemas de fallas en la corteza continental.

4.2.5 Parámetros sismológicos locales

Los parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas, que se utilizaron en la presente tesis (Tabla N°9), fueron tomados del trabajo de Roncal (2017).

Tabla N°9. Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas

Fuente	Parámetros de sismicidad local			
	M_{mín}	M_{máx}	β	Tasa
F1	4.3	8.1	1.286	3.1
F2	4.5	8	1.302	4.2
F3	4.8	8.6	1.732	3.98
F4	4.4	8.4	1.73	6.62
F5	4.8	8.4	1.473	2.58
F6	4.5	8.4	1.344	3.53
F7	4.1	7.9	0.991	1.3
F8	4.4	6.6	1.99	3.38
F9	4.5	7.3	2.04	6.47
F10	4.5	7	1.805	6.57
F11	4.8	7.8	2.251	4.85
F12	4.8	7.6	2.58	19
F13	4.3	7.4	1.491	3.71
F14	4.2	6.6	1.28	2.07
F15	4.6	6	2.334	2.52
F16	4.1	6.9	1.307	1.25
F17	4.4	7.3	1.697	3.87
F18	4.8	7.1	2.413	3.13
F19	4.8	7	2.307	2.92
F20	4.5	7.7	2.352	11.7
F21	4	7.1	0.58	0.461
F22	4.1	7.2	1.068	1.32
F23	4.5	7	1.384	0.675
F24	4.4	7.4	1.314	1.28
F25	4.2	7	1.133	2.04
F26	4.6	6.7	1.384	0.889
F27	4.8	6.8	2.162	1.27
F28	4.5	7	1.667	2.85
F29	4.3	7	1.259	1.42

Nota. Tomado de Roncal (2017)

4.2.6 Leyes de atenuación

Las leyes de atenuación utilizadas en el presente trabajo se basan en las propuestas por Roncal (2017), en donde se emplean las leyes de BC Hydro – Abrahamson (2016), Zhao et al. (2006) y Youngs et al. (1997) para las fuentes de subducción, tanto para interfase como intraplaca. Por otro lado, se utilizaron las leyes de Campbell & Bozorgnia (2014), Chiou & Youngs (2015), Abrahamson et al. (2014) y Sadigh et al. (1997) para las fuentes continentales; el peso otorgado a cada ley de atenuación se muestra en la Figura N°31.

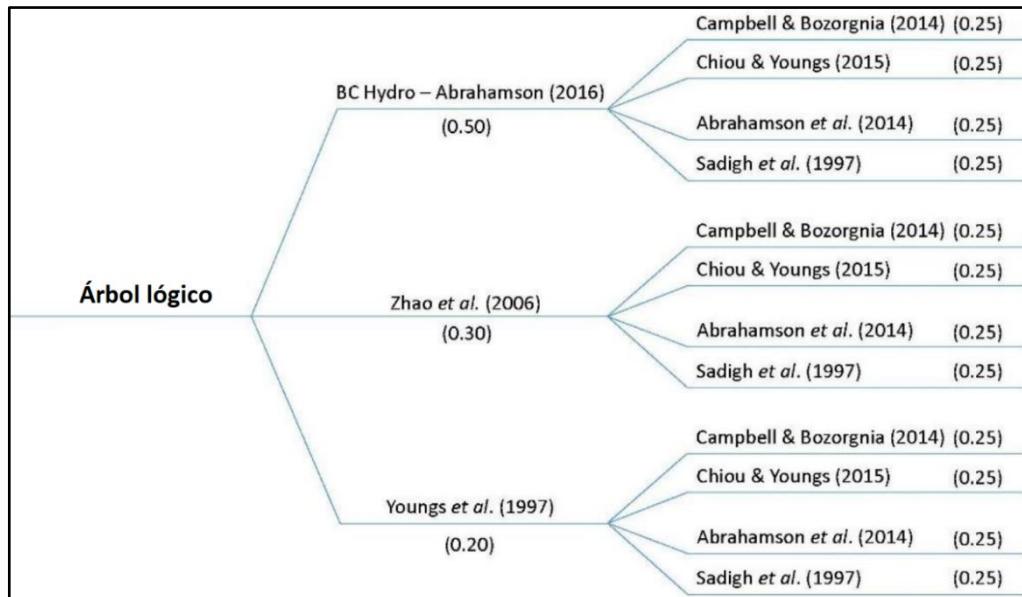


Figura N°31. Árbol lógico utilizado para el análisis probabilístico. Tomado de Roncal (2017)

4.2.7 Marco sismotectónico local

Teniendo en cuenta que el área de estudio se encuentra en la zona costera central del Perú, el presente trabajo toma como referencia a la investigación realizada por Villegas et al. (2016). En esta investigación se evalúan los escenarios más críticos por sismo debido a la acumulación de energía que no se ha liberado desde el gran terremoto de Lima de 1746. La investigación se realizó en base a observaciones geodésicas desde el año 2008 al 2014 donde se ha monitoreado la deformación de la corteza terrestre, logrando identificar las zonas de mayor acoplamiento sísmico.

El trabajo de Villegas et al. (2016) señala que la zona acoplada con mayor dimensión se ubica frente a la costa de la región central de Perú. Esta zona acoplada abarca una longitud de 470 km, la cual, de liberar toda la energía sísmica acumulada hasta la fecha, podría generar un sismo de magnitud entre 8.6 - 8.8Mw como se muestra en la Figura N°32.

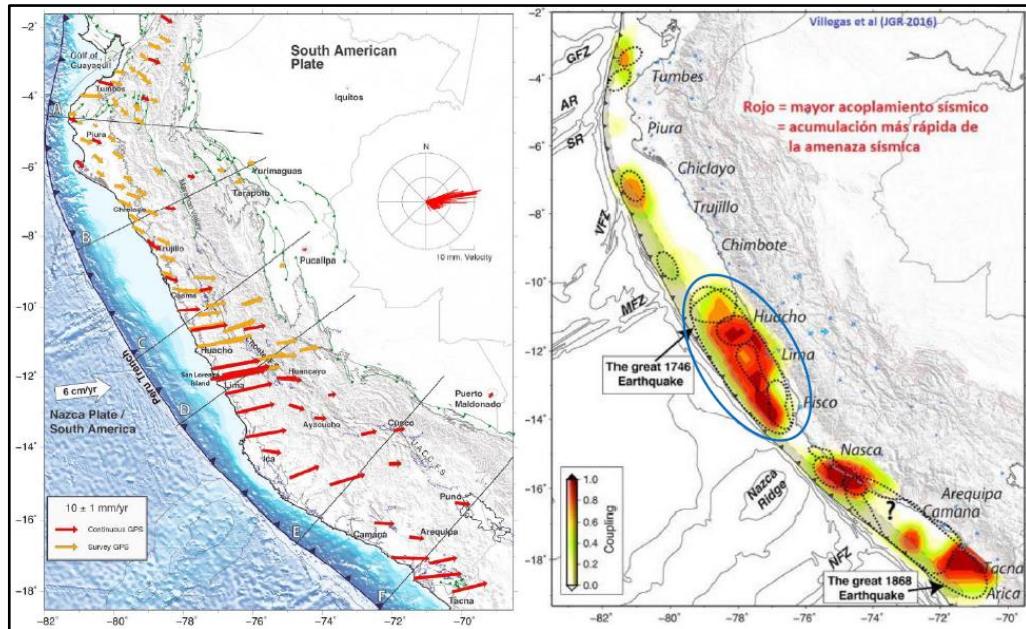


Figura N°32. Mapa de deformación de la corteza terrestre (izquierda) y de acoplamiento sísmico (derecha) para la zona de subducción del Perú. Tomado de Villegas et al. (2016)

Bajo este contexto Villegas et al. (2016) señala que el evento sísmico esperado en la ciudad de Lima podría presentar una magnitud de 8.8 Mw y una profundidad de 35 km (sismo de interfase), un evento similar al ocurrido en el año 1746. Consecuentemente, sería el escenario más crítico en el área de estudio, la cual se encuentra ubicada muy cerca al acoplamiento sísmico.

Conociendo que en el área de acoplamiento sísmico podría presentarse un evento de magnitud 8.8 Mw, el parámetro de magnitud máxima de la fuente 3 que presenta el modelo sismotectónico presentado por Roncal (2017) fue modificado de una magnitud máxima de 8.6 Mw a un valor de 8.8 Mw.

4.3 ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME

Para la evaluación de peligro sísmico se utilizó el programa R-CRISIS ver 20.3.0 y se consideró hasta un periodo estructural de 3.0 segundos para la estimación del espectro de peligro uniforme. Además, teniendo en cuenta que el presente trabajo está orientado para estructuras cuyo periodo de retorno sea de 475 años, se estimaron las curvas considerando dicho valor.

La Figura N°33 muestra los espectros de peligro uniforme para suelos tipo A y C según el IBC (2006) para un periodo de retorno de 475 años. Estos espectros serán utilizados en el análisis de respuesta de sitio (Capítulo VI) en donde se seleccionarán escenarios sísmicos y se realizará el ajuste espectral de los

registros sísmicos a uno de los espectros estimados. Posteriormente se hará un análisis unidimensional para distintos perfiles sísmicos con la finalidad de estimar el movimiento en superficie del suelo.

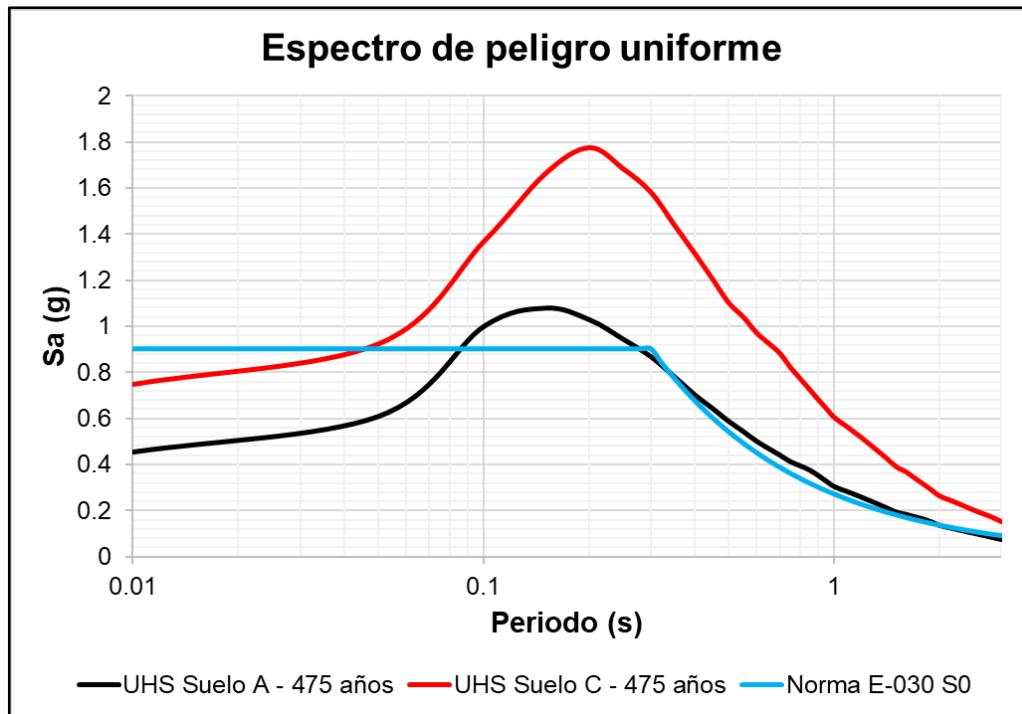


Figura N°33. Espectros de peligro uniforme obtenidos y espectro de diseño.

CAPÍTULO V. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL SUELO

5.1 INTRODUCCIÓN

El proceso de subducción de las placas Nazca y Sudamericana gobiernan la actividad sísmica del Perú. Un sismo se genera por una liberación de energía a nivel de las placas tectónicas en forma de ondas sísmicas que viajan a través de toda la corteza y finalmente llega a la superficie generando daños a la población. Por esta razón, es importante comprender como estas ondas viajan a través del suelo y como el suelo reacciona frente a estas solicitudes sísmicas con la finalidad de poder elaborar diseños sismorresistentes.

Partiendo del hecho de que las ondas sísmicas viajan a través del suelo, es importante diferenciar los tipos de ondas y establecer cuál es la más importante y la que más daño genera durante un evento sísmico. Sin embargo, no resulta conveniente esperar a que se genere un sismo para comprender el comportamiento del suelo frente a estas ondas sísmicas. Por esta razón, en este capítulo se pretende explicar algunos ensayos y métodos que permitan conocer las características dinámicas más influyentes y las que se encuentran establecidas en los principales códigos de diseño sismorresistente.

Como se explicó en el Capítulo III, los distritos de La Perla y San Miguel presentan una diversificación en sus tipos de suelos y por lo tanto pueden tener distintas respuestas en las estructuras que se encuentran cimentadas sobre ellas. Por esta razón, la información obtenida en las exploraciones geológicas y geotécnicas son de gran utilidad para obtener una mejor caracterización dinámica del suelo.

5.2 INFORMACIÓN RECOLGIDA

En el presente trabajo se ha recopilado una serie de ensayos de los diversos proyectos que se han realizado en los distritos de La Perla y San Miguel. Los ensayos recopilados para esta sección fueron: Medición puntual de microtremores, Refracción Sísmica, Ensayos MASW-MAM, Arreglos de microtremores y Ensayo Columna Resonante y Corte Torsional (RC-TS); las tablas N°10 y 11 muestran el resumen de la cantidad de ensayos recopilados para cada distrito:

Tabla N°10. Cantidad de ensayos geofísicos recopilados en el distrito de La Perla

La Perla		
Item	Tipo de ensayo	Cantidad
1	Medición puntual de microtremores	37
2	Refracción sísmica	8
3	Ensayo MASW-MAM	9
4	Arreglos de microtremores	3
5	Ensayo RC-TS	1

Tabla N°11. Cantidad de ensayos geofísicos recopilados en el distrito de San Miguel

San Miguel		
Item	Tipo de ensayo	Cantidad
1	Medición puntual de microtremores	165
2	Refracción sísmica	42
3	Ensayo MASW-MAM	41
4	Arreglos de microtremores	4

La información detallada de los ensayos recopilados se muestra en las Tablas N°25, 26, 27, 28, 29, 30 y 31 del ANEXO A-2. En algunos casos se pudo tener acceso a la información en digital, caso contrario, en algunos proyectos en donde la información recopilada tales como espectros H/V, curvas de dispersión y perfiles sísmicos Vs se muestra de manera gráfica; esta información fue digitalizada con el programa Simple Digitizer versión 3.2.

A continuación, se presentan los resultados de la información recopilada, los cuales consisten en: razones espectrales H/V, perfiles sísmicos Vs superficiales, perfiles sísmicos Vs profundos y curva de degradación obtenida en el laboratorio.

5.2.1 Razones espectrales H/V recopiladas

La Figura N°34 muestra las razones espectrales H/V del distrito de La Perla y se observan una predominancia en los períodos cortos entre 0.1 y 0.2 s, mientras que en los períodos largos predominan valores mayores a 1 s. En el caso del distrito de San Miguel (Figura N°35) se observa una predominancia de períodos cortos para valores menores a 0.15 s aproximadamente. Por otro lado, en los períodos largos ya se observa que los períodos tienden a ser cercanos o menores a 1 s; es decir, tienen menores valores tanto para períodos cortos como para períodos largos si se compara con los espectros H/V del distrito de La Perla.

En ambos casos se observa una predominancia tanto en los períodos cortos como para períodos largos; por esta razón, se decidió distinguirlos refiriendo a los períodos cortos como T1 y a los períodos largos como T0 como se muestra en la Tabla N°25 del ANEXO A-2.

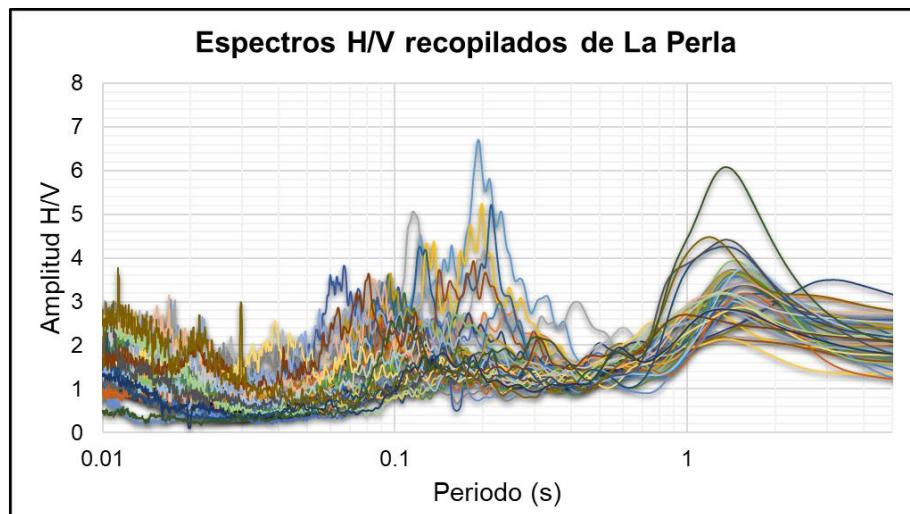


Figura N°34. Razones espectrales H/V recopilados del distrito de La Perla

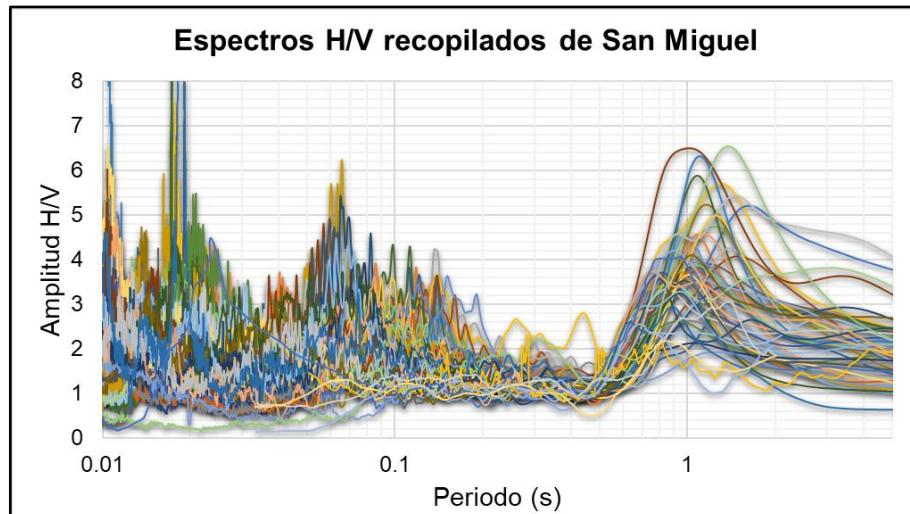


Figura 35. Razones espectrales H/V recopilados del distrito de San Miguel.

5.2.2 Perfiles sísmicos Vs superficiales recopilados

La Figura N°36 muestra los perfiles sísmicos Vs obtenidos de ensayos MASW recopilados en el distrito de La Perla que tienen un rango de valores de Vs30 entre 322 y 399 m/s; mientras que en el distrito de San Miguel (Figura N°37) se observa un rango de valores de Vs30 entre 319 y 649 m/s.

Los colores de los perfiles sísmicos Vs superficiales recopilados que se muestran en las Figuras N°36 y 37 representan a diferentes proyectos realizados en cada distrito, es decir, cada color representa un proyecto distinto. Por otro lado, se puede observar que el distrito de San Miguel presenta una gran variabilidad en los perfiles, en donde el color azul representa a la información obtenida del IGP (2021), el color amarillo del CISMID-FIC-UNI (2021), el verde del Convenio UNI-FONDES (2021) y el color rojo del CISMID-FIC-UNI (2015). Esta información indica que los perfiles estimados en lugares cercanos al acantilado (color azul) presentan un menor valor de velocidad de onda de corte (Vs) que los estimados en la zona nor-este del distrito de San Miguel (rojo). Los valores de velocidad de onda de corte (Vs) de los perfiles sísmicos superficiales se muestran con mayor detalle en las Tablas N°28 y 29 del ANEXO A-2.

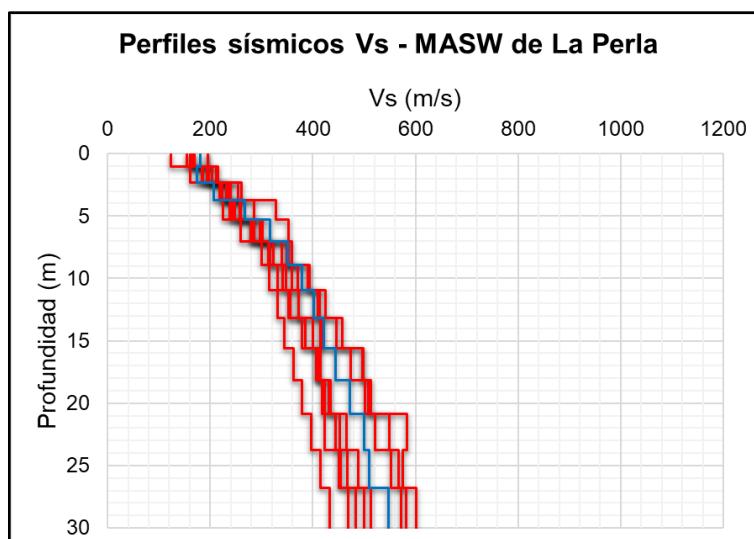


Figura N°36. Perfiles sísmicos Vs superficiales recopilados en el distrito de La Perla

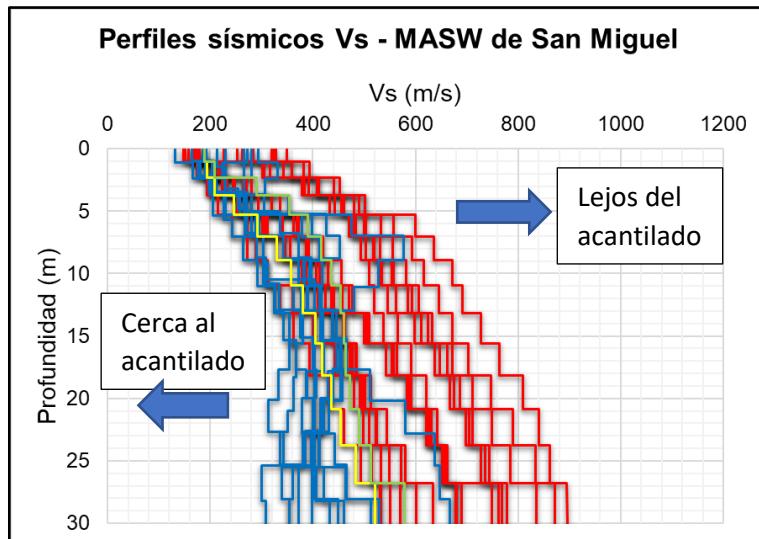


Figura N°37. Perfiles sísmicos Vs superficiales recopilados en el distrito de San Miguel,

5.2.3 Perfiles sísmicos Vs profundos recopilados

La Figura N°38 muestra los perfiles sísmicos Vs profundos recopilados tanto del distrito de La Perla como del distrito de San Miguel obtenidos por el ensayo de arreglos de microtremores. Se observa que sólo 3 de estos perfiles supera una profundidad de 80 m y velocidades mayores a 1000 m/s. Además, el perfil AM-03_LP y AM-03_SM muestran una tendencia diferente al perfil AM-04_SM en la parte profunda, lo que sugiere que es necesario realizar ensayos de arreglos de microtremores de radios grandes que permitan conocer y verificar la tendencia de los perfiles profundos en el área de estudio. Los valores de velocidad de onda de corte (Vs) de los perfiles sísmicos profundos se muestran con mayor detalle en las Tablas N°30 y 31 del ANEXO A-2.

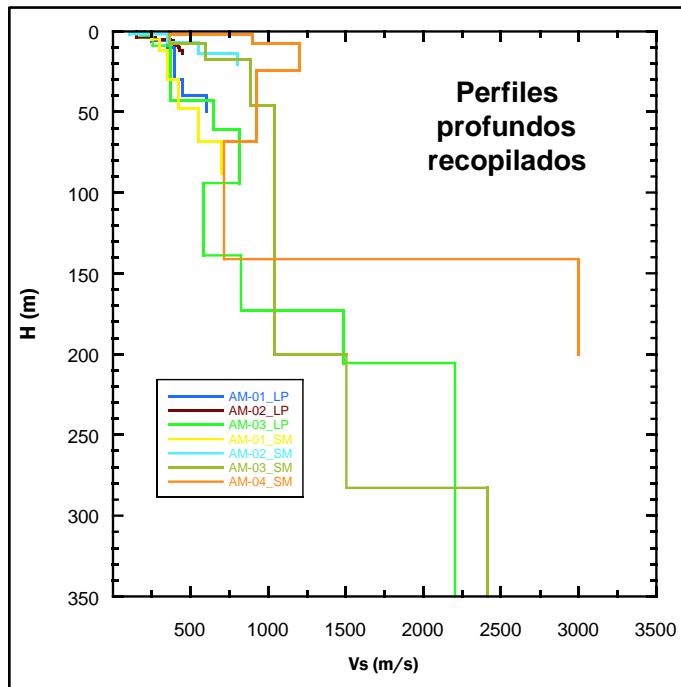


Figura N°38. Perfiles sísmicos Vs profundos recopilados en el área de estudio.

5.2.4 Curva de degradación

Como parte del proyecto “*Fusión de Algoritmos de Machine Learning y Tecnologías de Observación de la Tierra para la Mitigación de Desastres*” del CISMID-FIC-UNI (Moya, L. et al. 2021) se obtuvo muestras de suelo de una calicata realizada en el Colegio Leoncio Prado (muy cerca al perfil AM-03_LP) a 6 metros de profundidad (Figura N°39). Esta muestra fue ensayada en el Laboratorio Geotécnico de Anddes, donde se determinó que se trataba de una arena limpia (SM) según la clasificación SUCS.



Figura N°39. Calicata realizada muy cerca al perfil AM-03_LP

Las muestras obtenidas fueron sometidas al ensayo de Columna Resonante – Corte Torsional (RC-TS) para presiones de confinamiento de 150 kPa, 300 kPa y 600 kPa (Figura N°40) de modo que se puedan obtener las curvas de degradación de dicho material.



Figura N°40. Muestras sometidas al ensayo RC-TS (Moya, L. et al., 2021).

A partir del ensayo RC-TS se definieron las curvas de módulo de corte normalizado y razón de amortiguamiento como se muestran en las Figuras N°41 y 42 respectivamente, correspondientes al material superficial del perfil AM-03_LP, el cual será de utilidad para evaluar la respuesta de sitio en el siguiente capítulo.

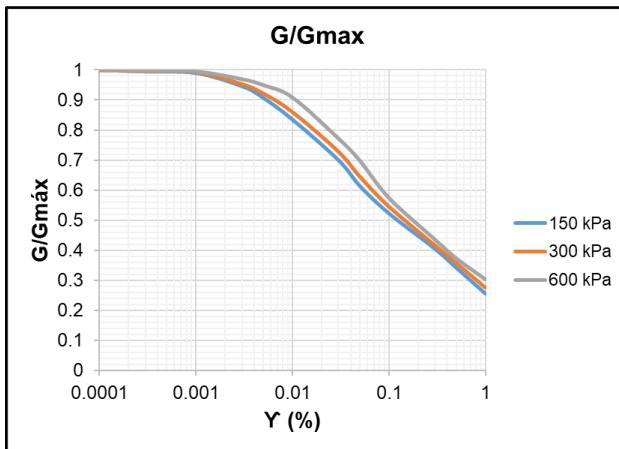


Figura N°41. Curva de módulo de corte normalizado del superficial del perfil AM-03_LP.

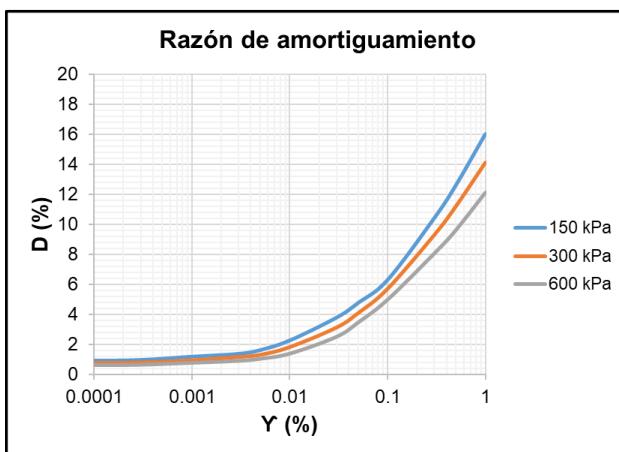


Figura N°42. Curva de razón de amortiguamiento correspondiente al material superficial del perfil AM-03_LP

5.3 MEDICIONES EN CAMPO

Con la finalidad de complementar la información recopilada y determinar las características dinámicas del área de estudio se realizaron 03 ensayos geofísicos, los cuales fueron: ensayo de medición puntual de microtremores, ensayo de Refracción Sísmica y MASW, y arreglos de microtremores. A continuación, se detallan el procedimiento ejecutado en campo de estos ensayos:

5.3.1 Medición puntual de microtremores

Como se pudo observar en la información recopilada, los distritos de La Perla y San Miguel presentan una predominancia tanto en los periodos cortos (T_1) como en periodos largos (T_0). Por esta razón, es necesario realizar mediciones

puntuales de microtremores con equipos que sean altamente sensibles y puedan captar ondas de periodo largo.

En este trabajo se realizó una campaña de medición puntual de microtremores en el área de estudio con dos equipos con distintas características: El primer equipo denominado GEODAS 15-HS desarrollado por la compañía Anet Co., Ltd que comprende 3 velocímetros triaxiales de 1 Hz de frecuencia, 1 adquisidor de datos GEODAS 15 HS, una computadora portátil NEC, cables de conexión y una batería. El segundo equipo de medición denominado TOKYO SOKUSHIN comprende 2 sensores velocímetros triaxiales de 0.2 Hz de frecuencia de la empresa Tokyo Sokushin, 1 laptop por sensor para la adquisición de datos, 2 antenas GPS y cables conectores (Figura N°43). Este último equipo presenta una mayor sensibilidad con respecto al otro y permite registrar ondas de periodo largo.

La ubicación de los ensayos de mediciones puntuales de microtremores son mostrados en la Tabla N°25 del ANEXO A-2, desde MT-037_LP hasta MT-047_LP para el distrito de La Perla y desde MT-165_SM hasta MT-181_SM para el distrito de San Miguel. Además, se cuenta con un mapa de ubicación de los ensayos recopilados y ejecutados (ANEXO D-1).



Figura N°43. Equipos de medición puntual de microtremores.

5.3.2 Ensayo de Refracción Sísmica y MASW

Puesto en que algunos lugares de la zona de estudio no se contaban con información de perfiles sísmicos, se realizó una serie de ensayos de Refracción Sísmica y MASW utilizando la misma línea de sensores separados 2 metros entre sí. Los equipos utilizados para esta campaña fueron los siguientes: 24 geófonos o

velocímetros verticales de 4.5 Hz de frecuencia, una laptop de la marca PANASONIC, cables que conectan los geófonos con el sismógrafo, un cable trigger que conecta la fuente impulsiva con el sismógrafo, comba, un plato metálico. En algunos casos se utilizaron platinas cuando la línea sísmica se instalaba sobre un material muy rígido como el asfalto de las pistas (sólo para el ensayo MASW).

Es importante señalar que para el ensayo de refracción sísmica el golpe (fuente que genera la excitación del suelo) con la comba sobre el plato metálico fue en el centro (Figura N°44) y también a un metro de cada extremo de la línea sísmica; es decir, la longitud total fue de 48 metros. Mientras que, en el ensayo MASW se golpeó a 5 y 10 metros de cada extremo, es decir, una longitud total de 66 metros.

La ubicación de los ensayos de Refracción Sísmica y MASW son mostrados en las Tablas N°26 y 28 del ANEXO A-2 respectivamente. En el caso de Refracción Sísmica los ensayos ejecutados son RS-08 para La Perla y de RS-42_SM hasta RS-44_SM para San Miguel y en el caso del ensayo MASW de MASW-09_LP hasta MASW-14_LP para La Perla y de MASW-41_SM hasta MASW-46_SM para San Miguel. Además, se cuenta con un mapa de ubicación de los ensayos recopilados y ejecutados (ANEXOS D-3 y D-6).



Figura N°44. Equipo de Refracción Sísmica y MASW

5.3.3 Arreglos de microtremores

Como se indicó anteriormente, era necesario la determinación de perfiles sísmicos profundos para evaluar la tendencia de estos. Se realizaron 3 ensayos de arreglos de microtremores en el área de estudio, la ubicación de estos ensayos se muestra

en la Tabla N°30 del ANEXO A-2. El primer arreglo AM-04_LP se realizó con radios de 50, 100, 150 y 200 metros. El segundo arreglo AM-05_SM con radios de 50, 100, 200 y 300 metros. Finalmente, el arreglo AM-06_SM con radios de 50, 100, 200 y 400 metros.

El equipo utilizado para la medición de arreglos de microtemores son: 4 sensores velocímetros triaxiales de 0.2 Hz de frecuencia de la empresa Tokyo Sokushin, 1 laptop y 1 antena GPS por sensor para la adquisición de datos y cables conectores. En este caso se utilizó un arreglo circular de 3 sensores inscritos en una circunferencia y 1 sensor ubicado en el centro. Es importante señalar que la data registrada tiene un tiempo promedio de 40 minutos por radio y de manera sincronizada mediante las antenas GPS.

La ubicación de los ensayos ejecutados de arreglos de microtremores son mostrados en la Tabla N°30, AM-04 para el distrito de La Perla, AM-05_SM y AM-06_SM (Figura N°45) para el distrito de San Miguel. Se cuenta con un mapa de ubicación de los ensayo recopilados y ejecutados (ANEXO D-9).

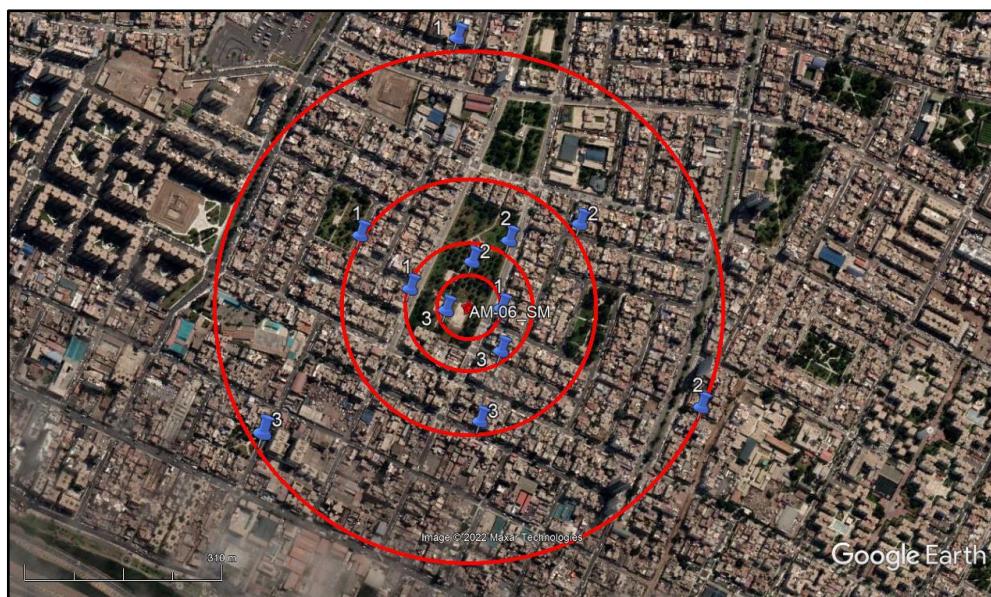


Figura N°45. Distribución de sensores inscritos en una circunferencia.

Las Tablas N°12 y 13 muestran un resumen de la cantidad de ensayos ejecutados en los distritos de La Perla y San Miguel

Tabla N°12. Cantidad de ensayos ejecutados en el distrito de La Perla

La Perla		
Item	Tipo de ensayo	Cantidad
1	Medición puntual de microtremores	11
2	Refracción sísmica	1
3	Ensayo MASW-MAM	6
4	Arreglos de microtremores	1

Tabla N°13. Cantidad de ensayos ejecutados en el distrito de San Miguel

San Miguel		
Item	Tipo de ensayo	Cantidad
1	Medición puntual de microtremores	17
2	Refracción sísmica	3
3	Ensayo MASW	6
4	Arreglos de microtremores	2

5.4 PROCESAMIENTO EN GABINETE

La data adquirida en campo fue posteriormente procesada en gabinete mediante una serie de programas de cómputo; estos incluyen desde formulaciones simples hasta algoritmos con una matemática muy compleja. A continuación, se hará un resumen del procesamiento de los 4 ensayos:

5.4.1 Medición puntual de microtremores

Los registros obtenidos en campo fueron adquiridos con un tiempo de grabación entre 20 a 30 minutos. Las señales fueron filtradas de tal manera que los ruidos externos a la vibración natural del suelo sean suprimidos, además se tomaron ventanas de 20 segundos y un suavizado de 0.3.

Las Figuras N°46 y 47 muestran las razones espectrales H/V tanto de los ensayos recopilados (fondo gris) como de los ejecutados (demás colores) para ambos distritos. Sin embargo, como se señaló anteriormente, se presentan los picos T0 (periodos largos) y T1 (periodos cortos), pero de distinta forma. En ambos casos se puede observar que el pico T1 no es muy pronunciado y se encuentra en el rango de 0.07 a 0.2 segundos. Mientras que, en el caso de los periodos largos (T0) el valor cambia, es decir en el caso de La Perla se presentan valores mayores a 1 segundo y en San Miguel con valores menores a 1 segundo. Es importante indicar que debido a que la data adquirida también presenta registros de ondas de periodo largo (captados por el equipo Tokyo Sokushin) es decir, se puede observar una mejor definición de los periodos largos (T0) con respecto a los datos

recopilados de algunos proyectos. Las razones espectrales y los valores de periodo asignados para cada medición se muestran en el ANEXO D-2 y en las Figuras N°48 y 49 se pueden observar la distribución de valores de periodo T1 y T0 respectivamente en la zona de estudio.

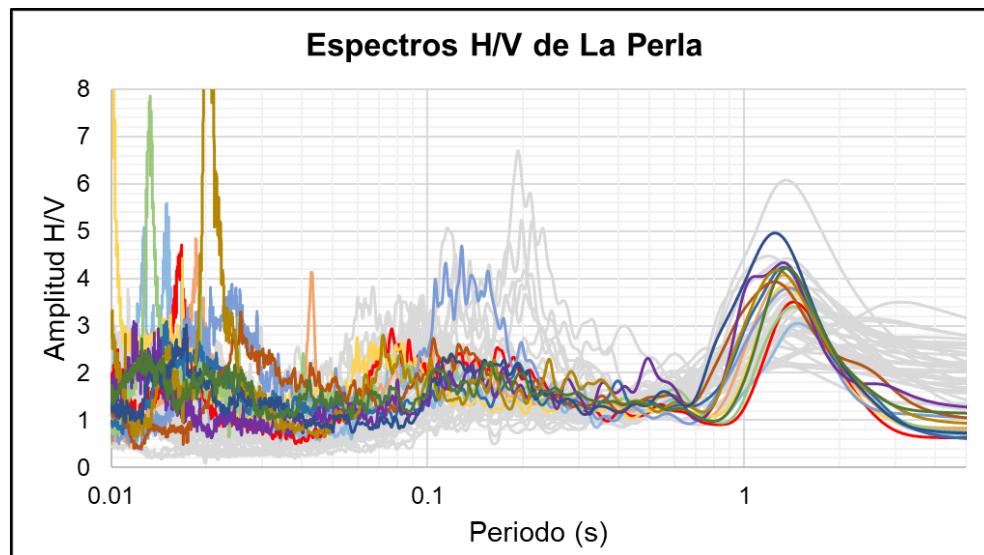


Figura N°46. Razones espectrales H/V en el distrito de La Perla

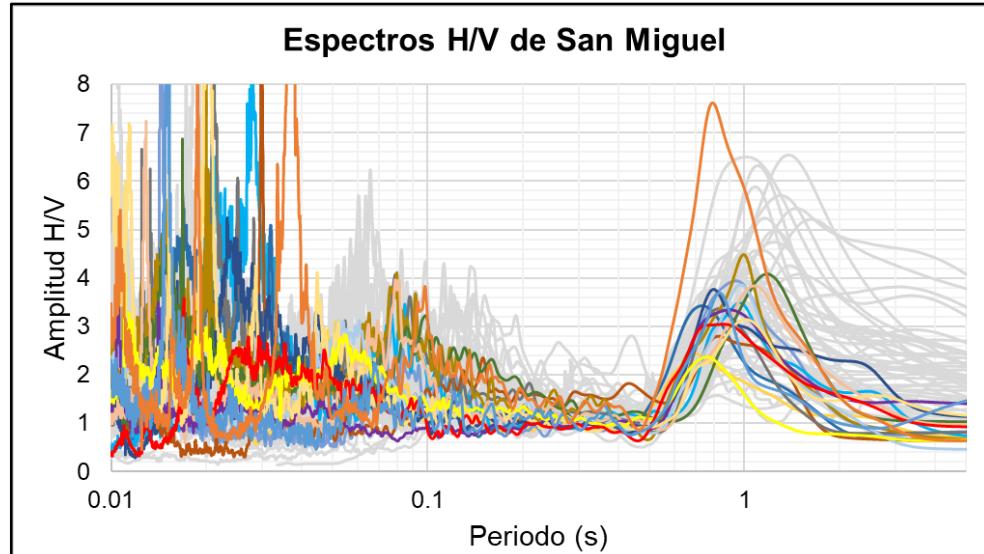


Figura N°47. Razones espectrales H/V en el distrito de San Miguel



Figura N°48. Distribución de valores de periodo T1 en el área de estudio



Figura N°49. Distribución de valores de periodo T0 en el área de estudio

5.4.2 Ensayo de Refracción Sísmica

La data adquirida en el ensayo de Refracción Sísmica fue procesada en el programa Seismlmager versión 4.4, en donde se trazan las curvas dromocrónicas midiendo los tiempos de llegada de las ondas p. Estas curvas dromocrónicas se pueden observar en el ANEXO D-4.

Los perfiles obtenidos a partir de las curvas dromocrónicas son de carácter bidimensional y se muestran en el ANEXO D-5. Estos perfiles fueron utilizados para la validación de los perfiles de velocidades de ondas de corte obtenidos de los otros ensayos.

5.4.3 Ensayo MASW

La información adquirida en el ensayo MASW fue procesada en el programa Seismlmager versión 4.4 en donde se definen las curvas de dispersión (ANEXO D-7). Mediante el método de mínimos cuadrados se realizó el proceso inverso y se obtuvo perfiles sísmicos que llegan hasta los 30 metros (ANEXO D-8).

Las Figuras N°50 y 51 muestran los perfiles sísmicos Vs superficiales correspondientes a los distritos de La Perla y San Miguel respectivamente. Se observa que los perfiles obtenidos en La Perla presentan la misma tendencia o una forma similar. Caso contrario ocurre en San Miguel, en donde los perfiles obtenidos se encuentran más al lado derecho (mayores velocidades Vs); la distribución de Vs30 promedio son mostradas en la Figura N°52.

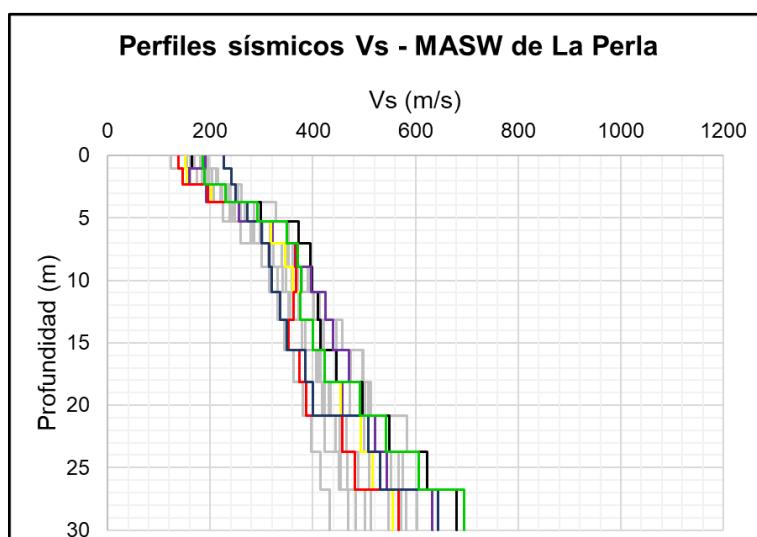


Figura N°50. Perfiles sísmicos Vs superficiales en el distrito de La Perla

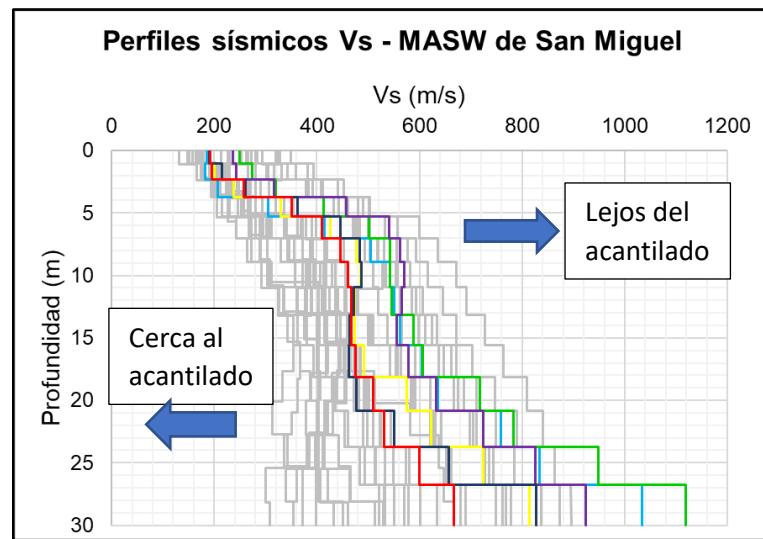


Figura N°51. Perfiles sísmicos Vs superficiales en el distrito de San Miguel



Figura N°52. Distribución de Vs₃₀ promedio en el área de estudio.

5.4.4 Arreglos de microtremores

La data adquirida de los arreglos de microtremores fue ordenada para obtener la curva de dispersión según el radio y el método de cálculo. Para obtener las curvas según los métodos F-K y SPAC 3, se realizó un filtrado manual de modo que se eliminen los ruidos externos a la vibración natural del suelo. Mientras que, para los demás métodos (SPAC, CCA y nc-CCA) se utilizó el programa BIDO versión 3.0 en donde se seleccionaron ventanas de 20 segundos para el análisis. Debido a que se ejecutaron arreglos con radios mayores a 50 metros, los cuales reflejan curvas de dispersión para periodos largos, se utilizó la curva de dispersión de los ensayos MASW cercanos a los arreglos para obtener una curva más completa (superficial y profunda) como se muestra en el ANEXO D-10.

Es importante mencionar que el arreglo AM-06_SM fue procesado teniendo como base las curvas de dispersión obtenidas en los ensayos realizados por Pastor et al. (2022). Esta información (Pastor et al., 2022) fue complementada con arreglos más grandes para obtener una curva de dispersión definitiva.

Una vez teniendo las curvas de dispersión definidas se realizó el proceso inverso mediante el método de algoritmos genéticos el cual requiere de rangos de velocidades y espesores como input. Se obtuvieron 5 perfiles por cada inversión de la curva, los que se promediaron para obtener un perfil definitivo por ensayo (ANEXO D-11).

Finalmente, el proceso de inversión es verificado, comparando las curvas de elipticidad obtenidas de los perfiles estimados con las razones espectrales H/V del centro de cada ensayo; de modo que estas deben tener similitud en forma como se muestra en el ANEXO D-12.

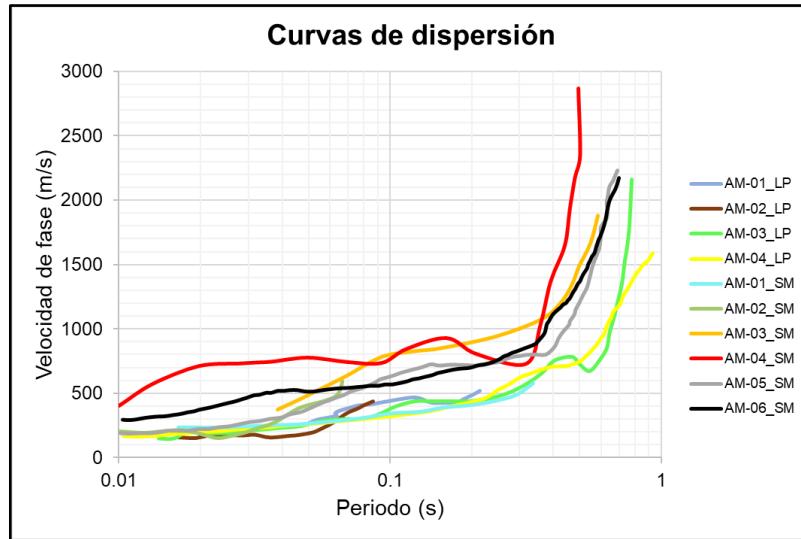


Figura N°53. Curvas de dispersión de los perfiles profundos.

La Figura N°53 muestra las curvas de dispersión obtenidas en cada perfil, en donde se observa que, en el distrito de La Perla las curvas de dispersión están por debajo de las de San Miguel, lo cual puede deberse a que este último presenta depósitos de suelos con mayor rigidez. Sin embargo, la curva del perfil AM-04_SM (color rojo) presenta un gran alejamiento con respecto a las demás curvas. Por otro lado, como se indicó anteriormente, existe una tendencia en los perfiles profundos como se muestra en la figura N°54, a excepción del perfil AM-04_SM (color rojo).

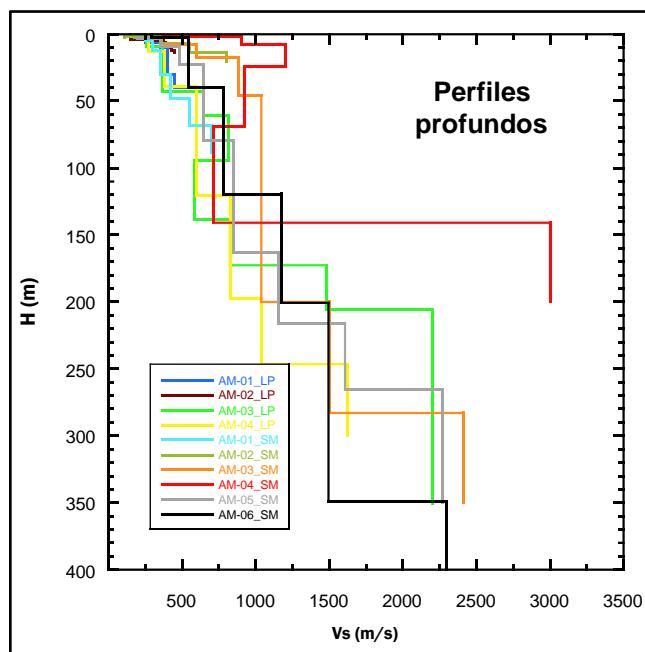


Figura N°54. Perfiles sísmicos Vs profundos

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO

El análisis de respuesta de sitio permite conocer el comportamiento del suelo frente a cargas dinámicas. Por lo tanto, como parte de la microzonificación sísmica de la zona de estudio, se evaluará la respuesta dinámica del suelo teniendo en cuenta la diversificación de materiales superficiales que pueden influir en los resultados del análisis.

6.1 MODELAMIENTO DE LOS DEPÓSITOS DE SUELO

Las características dinámicas del suelo en el área de estudio fueron estimadas en el Capítulo V. En este capítulo se pretende comprender los efectos de sitio que se producen en los depósitos de suelo mediante un análisis numérico unidimensional. Como primer paso, se seleccionaron 5 perfiles profundos obtenidos a partir de los ensayos de arreglos de microtremores, dichos perfiles Vs son: AM-03_LP, AM-04_LP, AM-03_SM, AM-05_SM y AM-06_SM. Como se puede observar en la Tabla N°31 del ANEXO A-2, la última capa de la mayoría de estos perfiles profundos llega hasta velocidades mayores a 2000 m/s. Sin embargo, el perfil AM-04_LP presenta una velocidad de 1625 m/s en su última capa; entonces, para tener un análisis más uniforme, se trabajó con los perfiles considerando que la última capa presenta velocidades cercanas a 1500 m/s como se muestra en la Figura N°55, la distribución de dichos perfiles se puede observar en el ANEXO E-1.

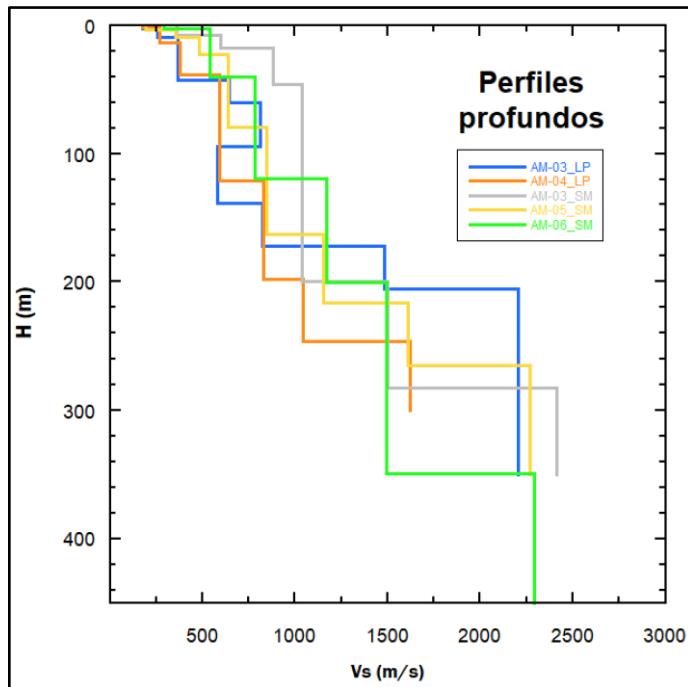


Figura N°55. Perfiles Vs profundos seleccionados

Para la caracterización de los materiales de los perfiles sísmicos, se tomó como referencia los materiales encontrados en las exploraciones de suelos mediante calicatas, SPT, ensayos MASW y pozos. Esta información se encuentra en los Capítulos III y V.

Como se observa en la Tabla N°14, los materiales de las dos primeras capas del perfil AM-03_LP corresponden a un suelo SM (arena limosa) cuyas curvas de degradación fueron obtenidas en laboratorio como se indicó en el Capítulo V. Por otro lado, la arcilla superficial de los demás perfiles fue modelada siguiendo las curvas de degradación de Zhang (2005) como materiales del cuaternario y con valores de índice de plasticidad (IP) entre 5 y 10 como se encontró en las calicatas cercanas a estos perfiles. Finalmente, para el modelamiento del material gravoso se tomó como referencia las curvas de degradación de Menq (2003) con un valor de $D_{50}=25$ mm, además, sabiendo que el parámetro más influyente en este modelo es el coeficiente de uniformidad (Cu). Es importante tener en cuenta que el modelo de Menq está basado en ensayos de laboratorio de materiales granulares cuyos valores de Cu varían entre 1.1 y 50.

Tabla N°14. Modelamiento de materiales del depósito de suelo considerado para el análisis unidimensional

AM-03_LP

Capa	Material	Espesor (m)	P.U. (kN/m ³)	Vs (m/s)	Modelo
1	Arena con arcilla 1	2.6	18	175.7	Laboratorio
2	Arena con arcilla 2	6.4	18.5	256.4	Laboratorio
3	Grava 1	33.8	18.5	367.5	Menq (2003)
4	Grava 2	17.7	22	643.7	Menq (2003)
5	Grava 3	33.6	22	814.1	Menq (2003)
6	Grava 4	44.5	23	580.3	Menq (2003)
7	Grava 5	33.9	23	825.2	Menq (2003)
8	Roca	-	23	1482.8	-

AM-04_LP

Capa	Material	Espesor (m)	P.U. (kN/m ³)	Vs (m/s)	Modelo
1	Arcilla 1	1.6	18	176.2	Zhang (2005)
2	Arcilla 2	11.5	19	272.0	Zhang (2005)
3	Grava 1	25.7	22	379.1	Menq (2003)
4	Grava 2	82.1	22	595.5	Menq (2003)
5	Grava 3	76.7	22	828.2	Menq (2003)
6	Grava 4	48.6	23	1042.1	Menq (2003)
7	Roca	-	24	1624.5	-

AM-03_SM

Capa	Material	Espesor (m)	P.U. (kN/m ³)	Vs (m/s)	Modelo
1	Grava 1	7.7	21.5	362	Menq (2003)
2	Grava 2	9.9	22	596	Menq (2003)
3	Grava 3	28.5	22	884	Menq (2003)
4	Grava 4	153.8	23	1038	Menq (2003)
5	Roca	-	23	1503	-

AM-05_SM

Capa	Material	Espesor (m)	P.U. (kN/m ³)	Vs (m/s)	Modelo
1	Arcilla	3.1	18	195.0	Zhang (2005)
2	Grava 1	6.3	21.5	356.0	Menq (2003)
3	Grava 2	13.1	22	485.2	Menq (2003)
4	Grava 3	56.8	22	641.1	Menq (2003)
5	Grava 4	83.7	23	846.2	Menq (2003)

6	Grava 5	53.3	23	1154.5	Menq (2003)
7	Roca	-	23	1608.0	-

AM-06_SM

Capa	Material	Espesor (m)	P.U. (kN/m ³)	V _s (m/s)	Modelo
1	Grava 1	2.6	22	291.9	Menq (2003)
2	Grava 2	37.2	22	542.4	Menq (2003)
3	Grava 3	79.5	23	781.9	Menq (2003)
4	Grava 4	81.5	23	1172.6	Menq (2003)
5	Roca	-	23	1493.3	-

Para definir el valor de Cu del material gravoso aluvial del área de estudio siguiendo el modelo de Menq (2003), se recopiló una serie de ensayos de laboratorio realizados en el Laboratorio Geotécnico del CISMID-FIC-UNI de la grava aluvial del río Rímac como se muestra en la Figura N°56. Se encontró que este material presenta altos valores de Cu, con un promedio de Cu=125, el cual está fuera del rango del modelo de Menq. Sin embargo, con finalidad de poder modelar la grava aluvial del conglomerado de Lima, se realizó un análisis de sensibilidad en la respuesta de la superficie del suelo de los perfiles considerados de modo que se obtenga un valor de Cu representativo para la grava de Lima siguiendo el modelo de Menq. En este trabajo se presenta un análisis de sensibilidad para valores de Cu=10, Cu=15 y Cu=20.

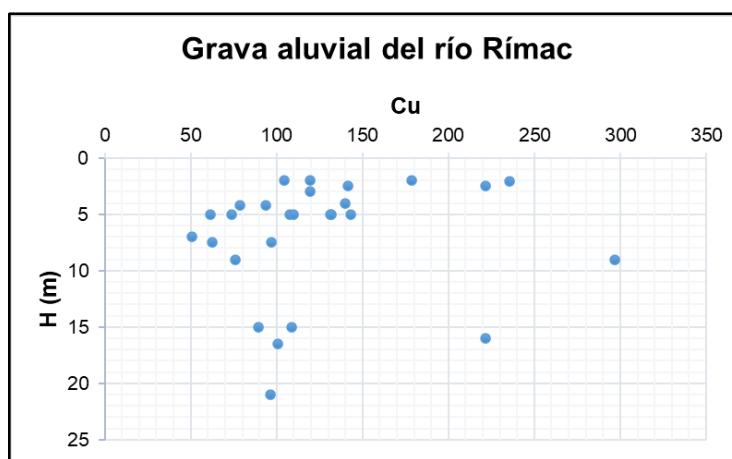


Figura N°56. Coeficientes de uniformidad (Cu) de la grava de Lima. Obtenido del Laboratorio Geotécnico del CISMID-FIC-UNI.

Es importante señalar que no sólo basta con la selección de las curvas de degradación de los materiales del depósito de suelo, adicional a esto, se debe seleccionar un modelo no lineal que describa el comportamiento histerético del

suelo. Como se indicó anteriormente, el modelo General Cuadrático/Hiperbólico (GQ/H) de Groholski (2016) presenta una buena estimación en la respuesta del suelo para todo el rango de deformaciones del material. Por esta razón, en este trabajo utiliza el modelo GQ/H para el análisis unidimensional.

Teniendo en cuenta que el modelo GQ/H requiere del parámetro de resistencia cortante máxima en falla, se tomó como referencia el trabajo de Conti et al (2020) para la estimación de dicho parámetro. En este análisis (Conti et al., 2020) se hace uso de los parámetros de resistencia mecánica cohesión y ángulo de fricción. En el caso de materiales arenosos-finos se tomó valores de cohesión de 10 kPa y un ángulo de fricción de 20° como valores representativos. Para el caso del material gravoso, se tomó como referencia una serie de ensayos de corte directo a gran escala realizados en el Laboratorio Geotécnico del CISMID-FIC-UNI. En estos ensayos se encontró que la grava de Lima presenta un valor aproximado de cohesión de 40 kPa y un ángulo de fricción de 45° como se muestra en la Figura N°57 y además estos valores son concordantes con los parámetros mecánicos encontrados en los estudios recopilados en el Capítulo III.

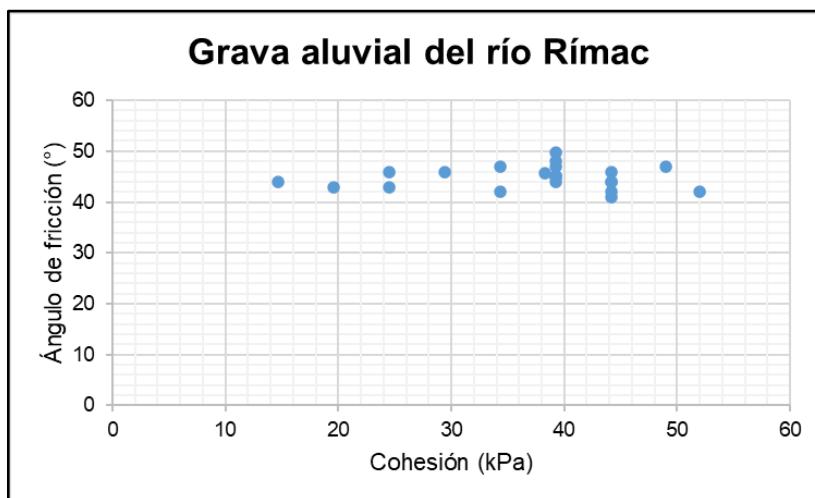


Figura N°57. Cohesión y ángulo de fricción de la grava de Lima. Obtenido del Laboratorio Geotécnico del CISMID-FIC-UNI.

6.2 ESCENARIOS SÍSMICOS PARA EL ANÁLISIS UNIDIMENSIONAL

Dadas las consideraciones del modelamiento de los materiales de los perfiles sísmicos para el análisis numérico, posteriormente se seleccionaron escenarios sísmicos que permitan simular el comportamiento del depósito frente a solicitudes sísmicas. Para el análisis unidimensional, se tomó en cuenta eventos de gran magnitud y se consideró que el mecanismo de subducción

predomina en la actividad sísmica de la zona de estudio, la Tabla N°15 muestra la selección de eventos sísmicos.

Tabla N°15. Escenarios sísmicos seleccionados para el análisis de respuesta

Orden	Escenario	Magnitud (Mw)	Profundidad (Km)	Estación	Mecanismo
1	Terremoto de Lima y Callao de 1966	8.0	37	PQR	Interfase
2	Terremoto de Áncash de 1970	7.8	43	PQR	Intraplaca
3	Terremoto de Lima de 1974	7.7	21	PQR	Interfase
4	Terremoto de Lima de 1974	7.7	21	SCO	Interfase
5	Terremoto del sur del Perú de 2001	8.4	32	MOQ	Interfase



Figura N°58. Distribución de epicentros, estaciones acelerográficas y el área de estudio

La Figura N°58 muestra la distribución de los epicentros (estrella) de los escenarios seleccionados, los cuales presentan mecanismos de subducción, la ubicación de las estaciones acelerográficas (globo rojo) y el área delimitada (borde rojo) es el área de estudio.

Los registros sísmicos correspondientes a cada escenario fueron filtrados (filtro Butterworth pasa banda de orden 4) y ajustados a un espectro de peligro uniforme

con un periodo de retorno de 475 años y para suelo A, el cual fue obtenido en el Capítulo IV. La información detallada correspondiente a cada escenario sísmico y los espectros de respuesta originales, filtrados y ajustados puede encontrarse en el ANEXO E-2.

6.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Dada las consideraciones señaladas para el modelamiento de los depósitos de suelo y los escenarios sísmicos, se realizó el análisis de respuesta teniendo en cuenta principalmente los siguientes aspectos:

- ✓ Se realizó un análisis lineal equivalente y no lineal.
- ✓ Se utilizó el modelo GQ/H.
- ✓ Las capas del depósito de suelo fueron nuevamente discretizadas de modo que la frecuencia máxima de cada estrato discretizado sea mayor a 30 Hz.
- ✓ Cada perfil de suelo tendrá 3 modelos distintos correspondientes a cada coeficiente de uniformidad (C_u) del material gravoso de $C_u=10$, $C_u=15$ y $C_u=20$.
- ✓ Se consideró como base del perfil a la última capa cuya velocidad V_s sea cercana a 1500 m/s.
- ✓ Se consideró que el movimiento de entrada se encuentra en un afloramiento rocoso.
- ✓ Cada perfil de suelo será sometido a 5 escenarios sísmicos indicados anteriormente.

La Figura N°59 muestra los espectros de respuesta promedio obtenidos del análisis numérico para un amortiguamiento de 5%. Se puede observar un decaimiento en los valores de aceleraciones espectrales cuando el parámetro C_u aumenta. Entonces, considerando que los espectros de peligro uniforme (UHS) para suelo A y C (líneas negra y roja respectivamente) son rangos aceptables para el comportamiento del depósito de suelo, se observó que el valor $C_u=20$ presenta un mejor ajuste y se determinó a este valor como representativo para la grava aluvial del área de estudio, siguiendo el modelo de Menq (2003).

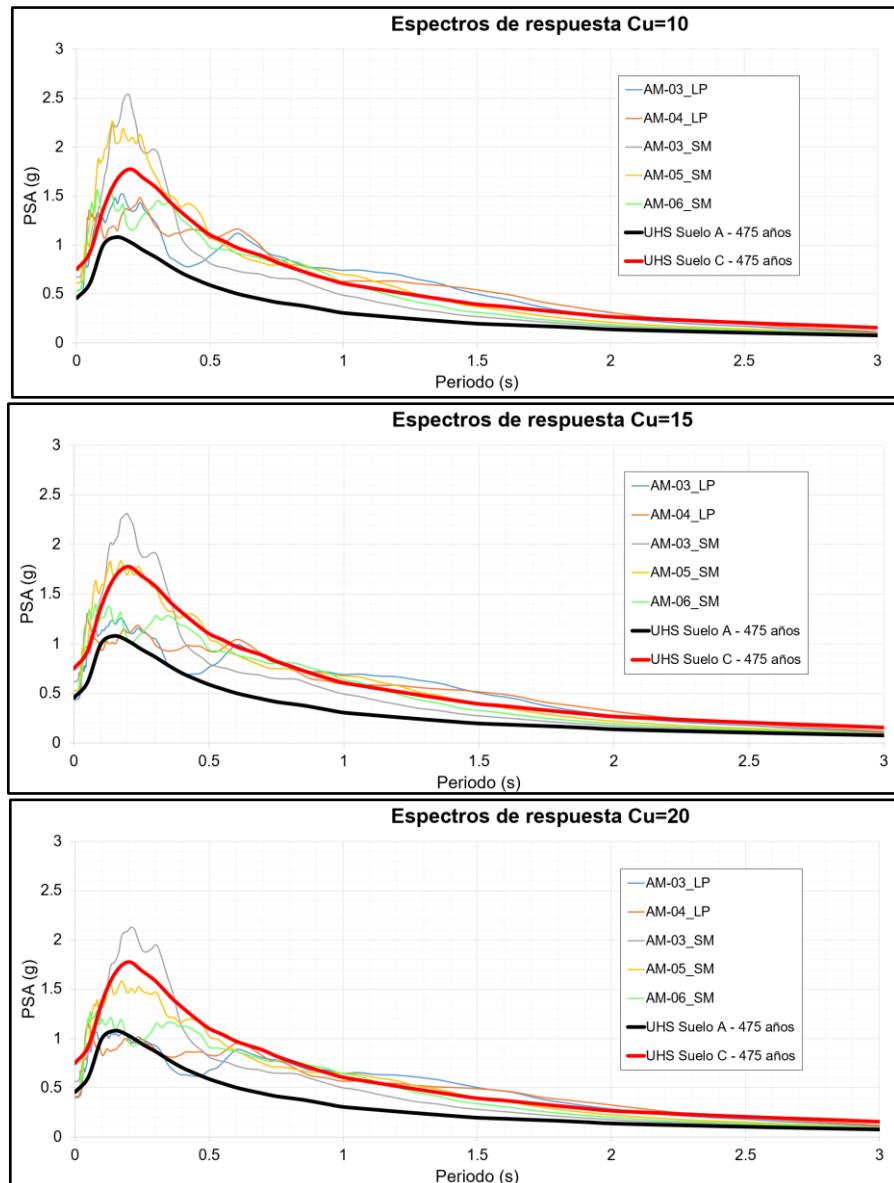


Figura N°59. Espectros de respuesta promedio en superficie de todos los perfiles.

En el ANEXO E-3 se muestran los espectros de Fourier en la superficie del depósito de suelo que presentan similitudes tanto en el análisis lineal equivalente como en el análisis no lineal. Las funciones de transferencia presentan algunas diferencias en ambos análisis, como se puede notar en el análisis lineal equivalente que presenta una aproximación al análisis no lineal para períodos mayores a 0.1 s. De igual manera se puede observar en los espectros de respuesta obtenidos en ambos análisis.

Si consideramos al análisis no lineal como una mejor aproximación al comportamiento real del suelo, en la Figura N°60 se muestran las funciones de transferencia promedio representativas para cada perfil. En estas funciones de

transferencia se observan algunos picos tanto en periodos cortos como en periodos largos. Sin embargo, para tener una mejor interpretación de estos resultados, se elaboró un perfil del depósito de suelo, el cual se muestra en el ANEXO E-4.

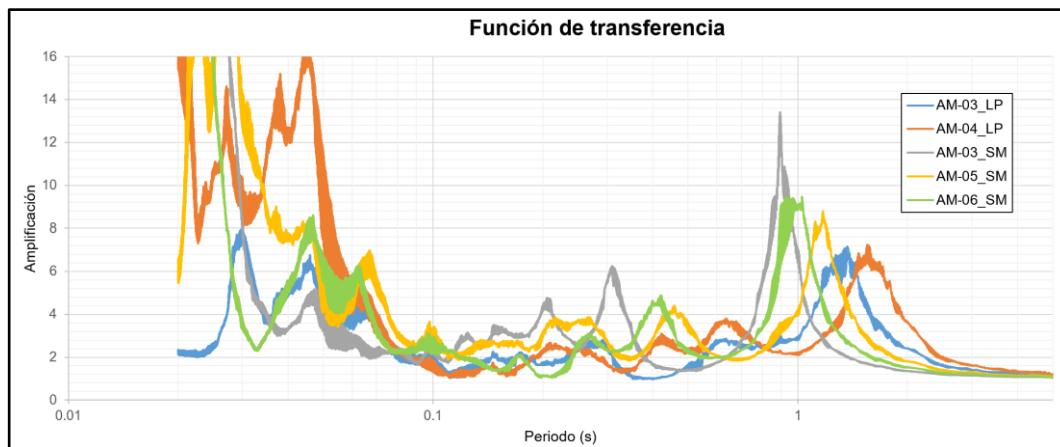


Figura N°60. Funciones de transferencia promedio obtenidas a partir del método no lineal.

En el ANEXO E-4, se observa que los depósitos de suelo del área de estudio presentan un aumento del material arenoso-arcilloso conforme va hacia el oeste. La grava aluvial se encuentra a mayor profundidad en la zona oeste del distrito de La Perla que va desde 0 hasta 11 metros de profundidad. Por lo tanto, la respuesta del suelo presentará diferencias a lo largo de la sección A-A'.

La Figura N°61 muestra los espectros de respuesta promedio obtenidos del análisis no lineal de los perfiles profundos que se encuentran en la sección A-A'. Se puede observar que el perfil AM-03_SM (línea gris) presenta material gravoso en todo el depósito y se tiene un espectro de respuesta en el cual los períodos cortos de 0.2 y 0.3 segundos presentan altos valores de aceleración y posteriormente decaden para períodos más altos. Sin embargo, esta respuesta no se observa en los perfiles AM-03_LP (línea azul) y AM-04_LP (línea verde), los cuales si presentan aceleraciones espectrales relativamente más altas para períodos largos mayores a 1 s. Estos valores se deben a la presencia de materiales relativamente flexibles de gran espesor depositados sobre materiales más rígidos. En el perfil AM-03_LP se encuentra el material gravoso de $V_s=367$ m/s y $V_s = 580$ m/s con espesores de 34 y 44 m respectivamente, mientras que en el perfil AM-04_LP tiene material gravoso con $V_s=379$ m/s y $V_s=595$ m/s con

espesores de 26 y 82 metros respectivamente. Estas características son la causa de los valores de aceleraciones espectrales amplificadas para períodos mayores a 1 segundo. Los perfiles AM-04_SM y AM-05_SM presentan respuestas intermedias entre los casos extremos analizados anteriormente.

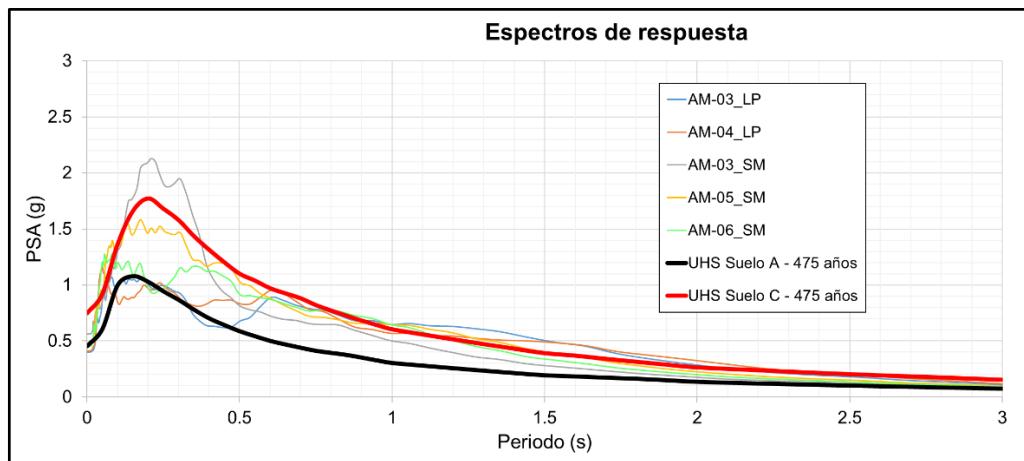


Figura N°61. Espectros de respuesta promedio obtenido del análisis no lineal de los perfiles profundos.

6.4 ESPECTROS DE RESPUESTA DE SISMOS REGISTRADOS

El análisis realizado anteriormente está basado en registros sintéticos ajustados al espectro de peligro uniforme (análisis probabilístico). Sin embargo, es conveniente realizar un análisis a los espectros de respuesta obtenidos de sismos reales ocurridos en el territorio peruano en los últimos años. Estos fueron registrados en estaciones acelerográficas instaladas en el área de estudio.

La Tabla N°16 muestra la información básica de los sismos reales seleccionados para el análisis de los espectros de respuesta, los cuales son producto del mecanismo de subducción de las placas tectónicas y además presentan magnitudes relativamente intermedias. Además, la Tabla N°17 muestra la ubicación de las estaciones acelerográficas instaladas en el área de estudio y una cercana (UNMSM), cuyo tipo de suelo es S1 y donde se han registrado los sismos mencionados anteriormente. Se estimaron las distancias epicentrales aproximadas medidas desde el epicentro del sismo hasta la ubicación de las estaciones acelerográficas, como se muestra en la Tabla N°18 y se observa que se han considerado tanto sismos de campo lejano como de campo cercano (Figura N°62).

Tabla N°16. Eventos sísmicos seleccionados para el análisis de los espectros de respuesta

Sismo	Fecha	Hora local (UTC-5)	Ubicación (°)		Profundidad (km)	Magnitud (Mw)
			Latitud	Longitud		
Lagunas 2019	26/05/2019	02:41:12	-5.73	-75.55	135	8.0
Ica 2021	12/05/2021	10:56:56	-14.27	-75.90	59	5.8
Mala 2021	22/06/2021	21:54:17	-12.77	-77.01	45	6.0
Callao 2021	28/11/2021	01:32:29	-12.06	-77.54	64	5.2
Amazonas 2021	28/11/2021	05:52:12	-4.43	-76.94	126	7.5
Lima 2022	07/01/2022	05:27:05	-11.97	-76.84	105	5.6

Tabla N°17. Ubicación de las estaciones acelerográficas instaladas en el área de estudio.

Estación	Distrito	Ubicación (°)		Institución
		Latitud	Longitud	
PRADO	La Perla	-12.07	-77.12	Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID-FIC-UNI
PUCP	San Miguel	-12.07	-77.08	Pontificia Universidad Católica del Perú
UPCSM	San Miguel	-12.09	-77.10	Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID-FIC-UNI
UNMSM	Lima	-12.04	-77.54	Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID-FIC-UNI

Tabla N°18. Distancias epicentrales de los sismos reales seleccionados

Sismo	Estación	PGA-EW (cm/s ²)	PGA-NS (cm/s ²)	Distancia epicentral (km)
Amazonas 2021	UPCSM	6.4	6.2	845.6
	UNMSM	3.9	4.2	842.4
	PUCP	4.9	3.0	844.2
Lagunas 2019	PRADO	12.5	16.2	733.7
	PUCP	11.0	6.6	732.5
	UPCSM	13.6	-17.2	734.2
Ica 2021	PRADO	3.0	-21.3	280.1
	UPCSM	3.0	4.0	277.8
	PUCP	59.6	55.7	77.1
Mala 2021	UPCSM	-58.7	-102.9	76.0
	UNMSM	-31.8	35.1	79.1
	UPCSM	-24.5	22.7	48.7
Callao 202	UNMSM	7.7	-8.3	49.4
	PUCP	15.9	9.8	50.2

Sismo	Estación	PGA-EW (cm/s ²)	PGA-NS (cm/s ²)	Distancia epicentral (km)
Lima 2022	PUCP	39.7	33.3	25.1
	UPCSM	-87.4	54.2	27.2



Figura N°62. Ubicación de los eventos sísmicos seleccionados para el análisis comparativo.

Los espectros de respuesta de aceleraciones de los sismos de Lagunas, Ica, Mala, Callao, Amazonas y Lima se muestran en las Figuras N°63, 65, 67, 69, 71 y 73. Estos espectros presentan magnitudes intermedias, y se puede observar ciertos picos tanto en periodos cortos como en periodos largos. Si observamos la Figura N°62, notamos que los sismos de Ica, Mala, Callao y Lima presentan distancias epicentrales relativamente cortas y sus espectros de respuesta (Figuras N°65, 67, 69 y 73 respectivamente) muestran amplificaciones en periodos cortos, lo cual es concordante con los efectos de campo cercano, en donde las ondas de altas frecuencias son predominantes. Por otro lado, los sismos de Lagunas y Amazonas presentan grandes distancias epicentrales y sus espectros de respuesta (Figuras N°63 y 71 respectivamente) muestran picos en periodos largos. En el caso de la estación PRADO (La Perla) los picos se forman en periodos mayores a 1 segundo,

mientras que en la estación UPCSM (San Miguel) se forman los picos en periodos largos menores a 1 segundo, lo cual es concordante con el análisis de respuesta unidimensional realizado anteriormente (acelerogramas sintéticos ajustados espectralmente); en donde la presencia de material flexible a grandes profundidades generan picos en periodos mayores a 1 segundo (AM-03_LP), mientras que en los depósitos de material más rígido encontrados a menor profundidad, los picos en periodos largos son menores a 1 segundo (AM-06_SM), como se observa en la Figura N°61.

Las Figuras N°64, 66, 68, 70, 72 y 74 muestran los espectros de respuesta normalizados obtenidos de los sismos de Lagunas, Ica, Mala, Callao, Amazonas y Lima respectivamente y se compara con el espectro de diseño de la norma E-030. Se observa que la plataforma del factor de amplificación CxS de la norma peruana E-030 para periodos cortos es superada en sismos de campo cercano en muchos casos, lo mismo sucede para sismos de campo lejano. Sin embargo, en los sismos de campo lejano, al presentarse grandes distancias epicentrales con respecto a las estaciones instaladas en el área de estudio, éstos llegan con menor energía, lo cual se ve reflejado en los bajos valores de aceleraciones espectrales absolutas, mucho menores al espectro de diseño de la norma peruana E-030.

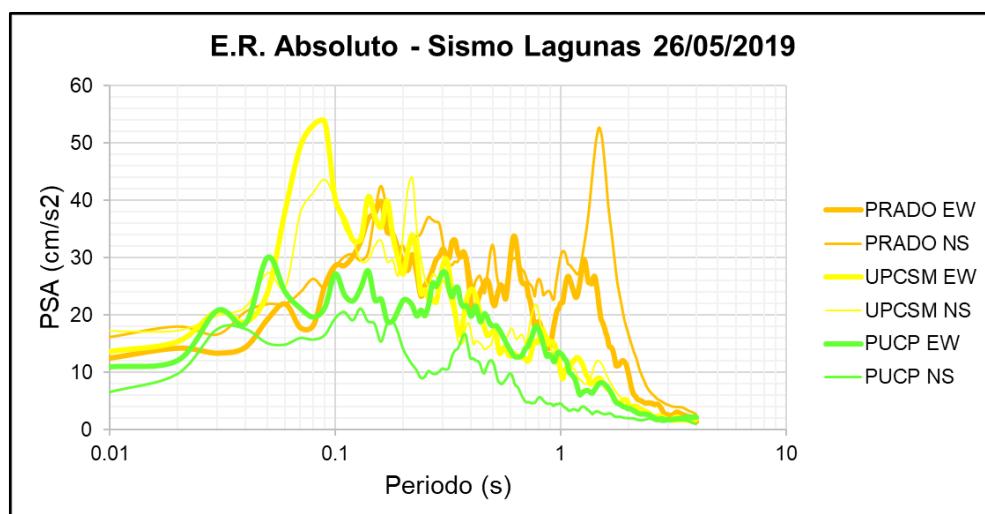


Figura N°63. Espectros de respuesta absolutos del sismo de Lagunas (2019).

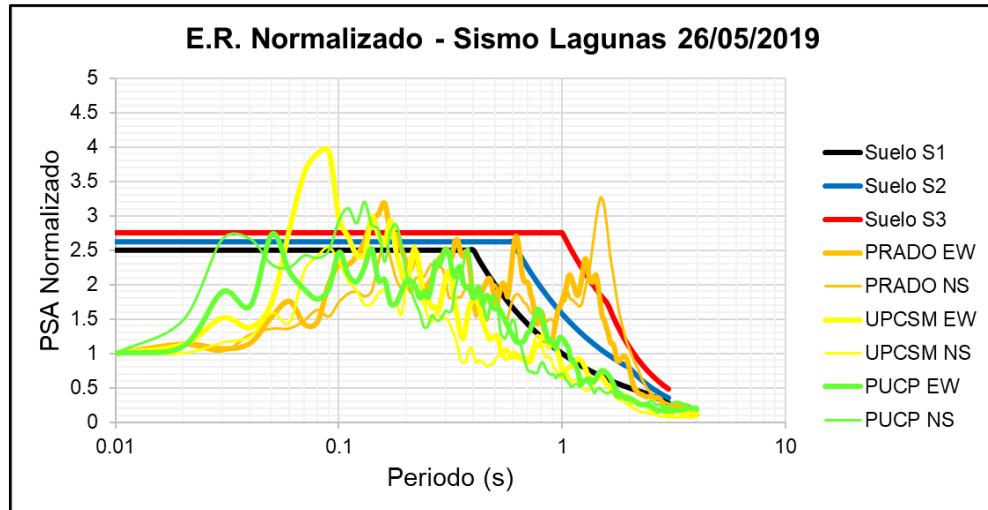


Figura N°64. Espectros de respuesta normalizados del sismo de Lagunas (2019).

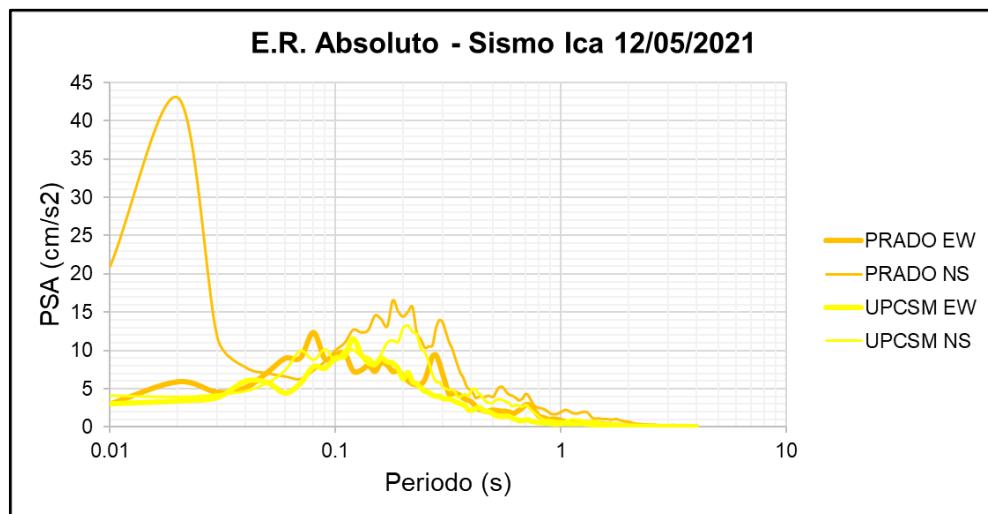


Figura N°65. Espectros de respuesta absolutos del sismo de Ica (2021).

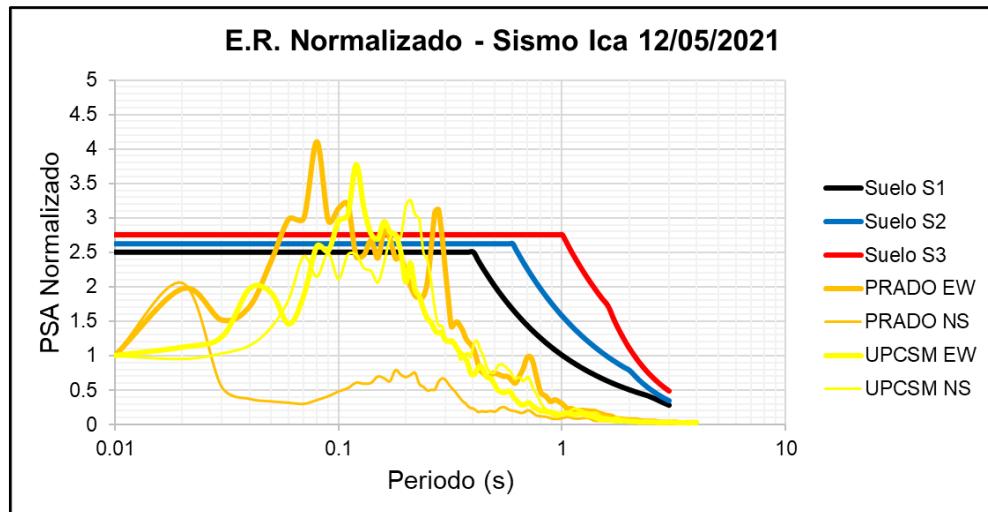


Figura N°66. Espectros de respuesta normalizados del sismo de Ica (2021).

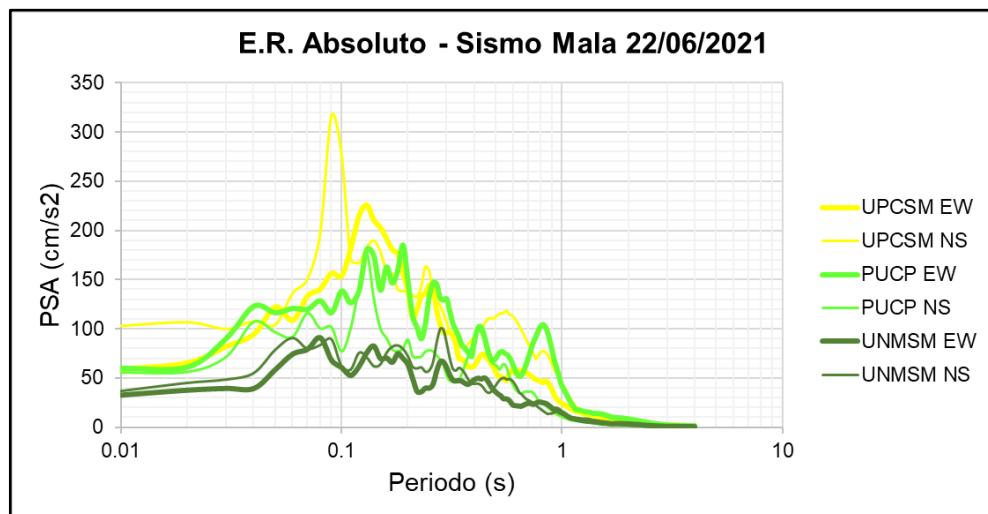


Figura N°67. Espectros de respuesta absolutos del sismo de Mala (2021).

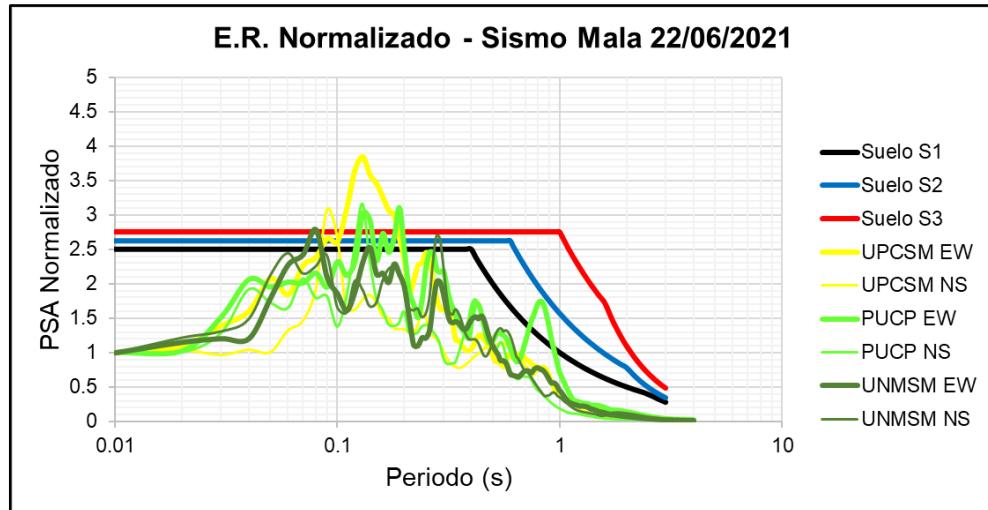


Figura N°68. Espectros de respuesta normalizados del sismo de Mala (2021).

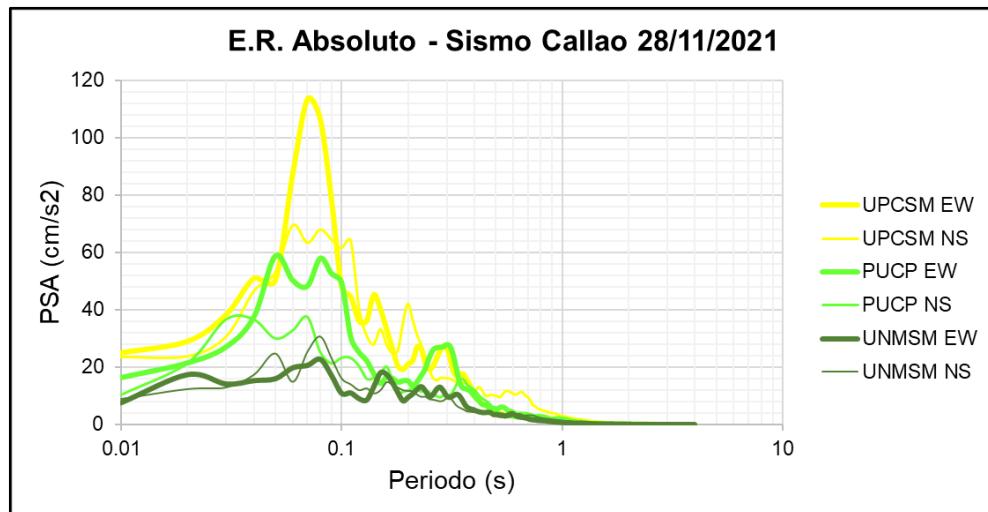


Figura N°69. Espectros de respuesta absolutos del sismo de Callao (2021).

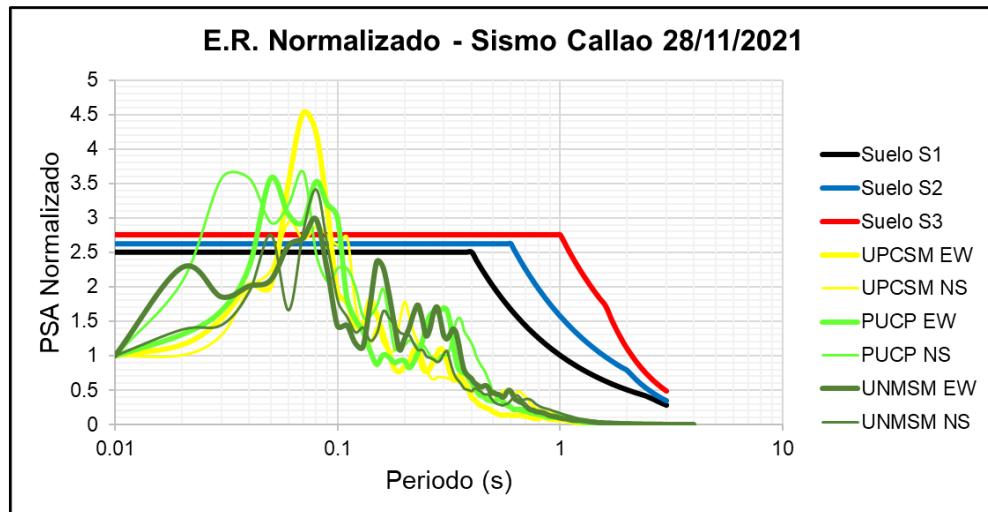


Figura N°70. Espectros de respuesta normalizados del sismo de Callao (2021).

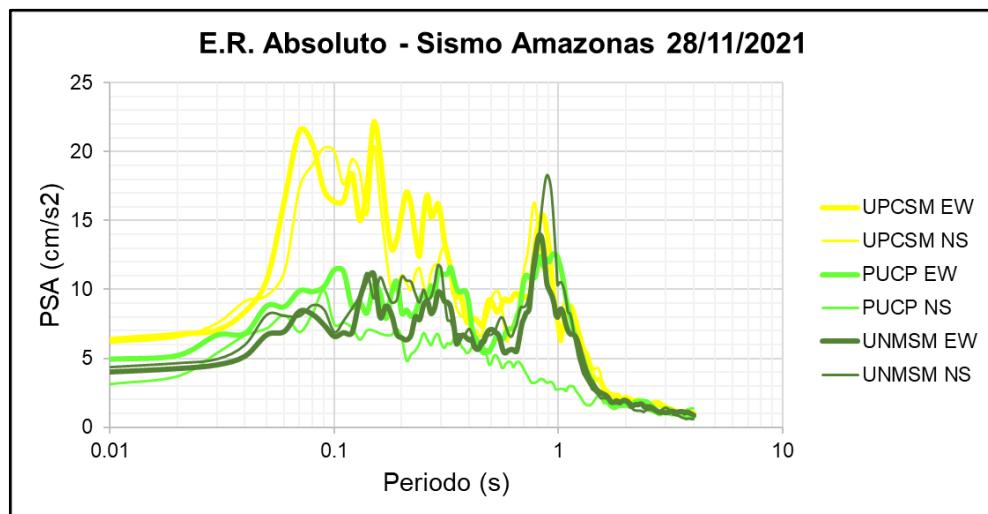


Figura N°71. Espectros de respuesta absolutos del sismo de Amazonas (2021)

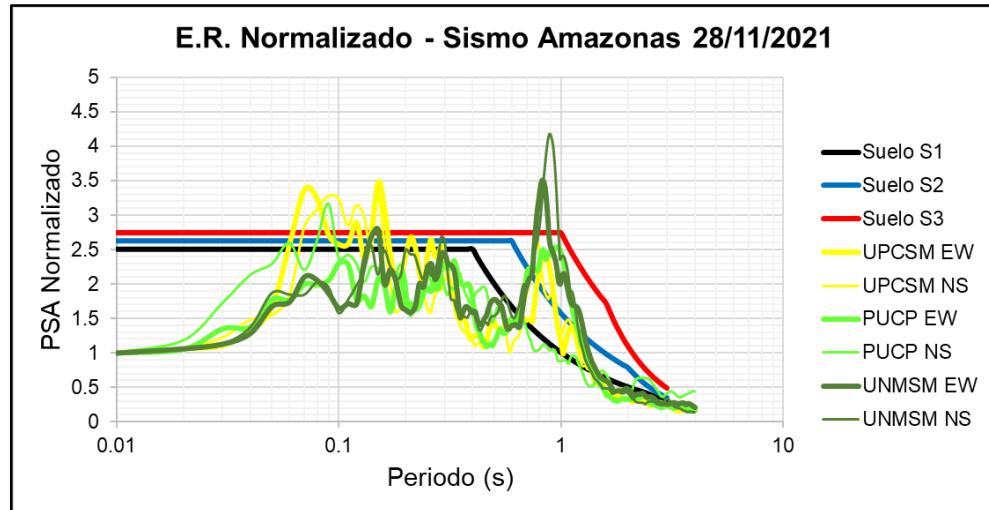


Figura N°72. Espectros de respuesta normalizados del sismo de Amazonas (2021)

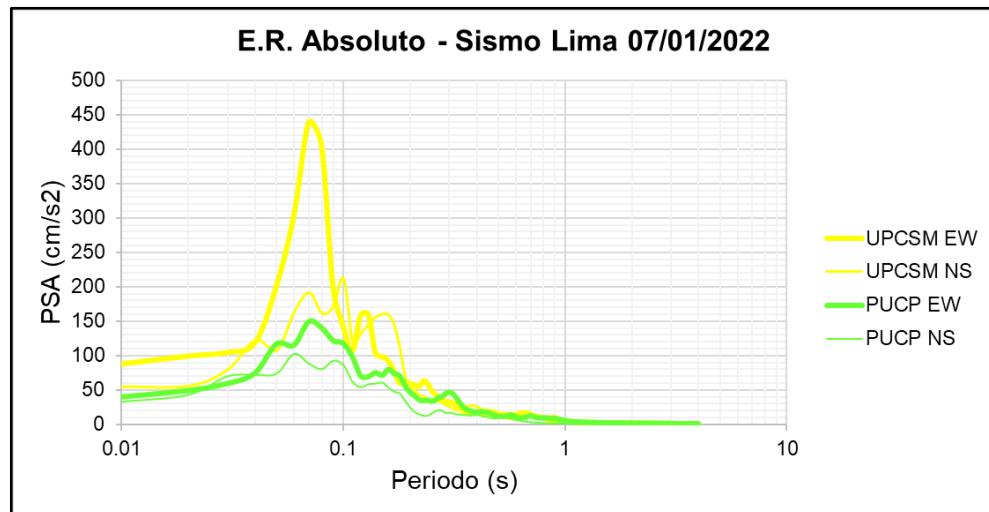


Figura N°73. Espectros de respuesta absolutos del sismo de Lima (2022)

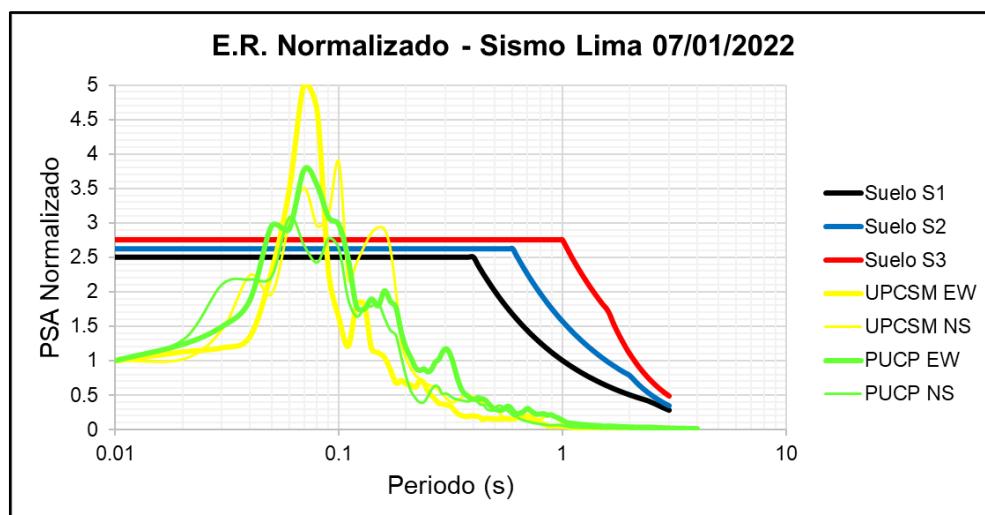


Figura N°74. Espectros de respuesta normalizados del sismo de Lima (2022)

CAPÍTULO VII. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Como se indicó en los capítulos anteriores, el Perú es un país que presenta una alta sismicidad que ha traído como consecuencia numerosos desastres a lo largo de los años, tanto pérdida de vidas como materiales, como sucedió en el terremoto de Pisco (Ica) en el año 2007 (8.0 Mw), el cual dejó aproximadamente 600 fallecidos, 1300 heridos, 48 mil viviendas totalmente destruidas e inhabitables y 450 mil personas damnificadas. Entonces, sabiendo que estos eventos sísmicos son imposibles de evitar y/o predecir, es necesario emplear herramientas que permitan reducir o mitigar los daños ocasionados por éstos.

Una herramienta básica para el desarrollo de estrategias de reducción de riesgos y desastres es la Microzonificación sísmica, cuya finalidad es determinar áreas con características locales que permitan tener una estimación preliminar de la respuesta del suelo frente a un evento sísmico.

La metodología empleada para el desarrollo de los mapas de microzonificación sísmica se basa en el procedimiento del CISMID-FIC-UNI (2015), la cual consiste principalmente:

- a) Recopilación de estudios geológicos, geomorfológicos, geotécnicos y geofísicos para tener conocer la distribución de las diferentes unidades geológicas.
- b) Ejecución de ensayos geofísicos para obtener registros de vibración ambiental de la zona de estudio.
- c) Análisis de los registros de vibración ambiental mediante la técnica de relaciones espectrales H/V.
- d) Desarrollo de modelos unidimensionales de perfiles de velocidad de onda de corte Vs representativos en zonas específicas y distribuidas en el área de estudio.
- e) Elaboración de mapas de isoperíodos del suelo y microzonificación sísmica en el área de estudio.

En los últimos años, La Perla y San Miguel, al igual que en otros distritos de Lima, han presentado un aumento en la construcción de viviendas multifamiliares de varios pisos; sin embargo, dada la diversificación de los tipos de suelos de ambos distritos continuos, es importante comprender los efectos locales que podrían presentar. Por esta razón, en este trabajo se presentan los mapas de

microzonificación producto del análisis que se ha llevado a cabo en los capítulos anteriores, siguiendo el procedimiento realizado por el CISMID-FIC-UNI (2015) para los estudios de microzonificación sísmica. Es importante señalar que los mapas presentados en esta tesis no pueden ser utilizados para proyectos de ingeniería, debiendo seguirse las directivas presentadas en el Reglamento Nacional de Edificaciones.

A continuación, se presentarán los mapas producto obtenidos a partir de los análisis realizados en los capítulos anteriores y que conforman la Microzonificación Sísmica de los distritos de La Perla y San Miguel:

7.1 MAPA DE PELIGROS NATURALES

Los peligros naturales son aquellos elementos del medio ambiente físico, o del entorno físico, perjudicial al hombre y causado por fuerzas ajenas a él, que pueden tener un origen natural o antropogénico; el primero está relacionado a factores de origen geológico y climático, mientras que el segundo, debido a la modificación de la naturaleza por la intervención humana (Burton et al, 1978).

El mapa de peligros naturales (ver MAPA 1 del ANEXO) está basado principalmente en la información recopilada del INGEMMET (1992) y la carta de inundación en caso de tsunami La Punta – Callao (DHN, 2014). A continuación, se describen los niveles de peligro encontrados en el área de estudio:

✓ **Peligro bajo**

La mayor parte de la llanura aluvial de los distritos de La Perla y San Miguel presentan peligro natural bajo ya que no se ha encontrado evidencias de algún factor geológico como un río, cerros, quebradas, etc. que pueda afectar a las personas.

✓ **Peligro alto**

El peligro natural alto se encuentra principalmente en los acantilados, los cuales presentan un alta pendiente y están conformados por material aluvial gravoso y en algunos casos relleno antropogénico, los cuales pueden desplomarse por causas naturales o por acción humana (Figura N°75); por otro lado, también puede presentarse caída de las gravillas que conforman el acantilado como ha ocurrido a lo largo de los últimos años.



Figura N°75. Deslizamiento producido en el acantilado el 08 de agosto de 2019. Tomado del IGP (2021)

✓ **Peligro muy alto**

El peligro natural muy alto se debe principalmente a tsunamis originados por sismos de subducción. Se han encontrado dos zonas que podrían ser afectadas; la primera se encuentra en la llanura aluvial al oeste del distrito de La Perla; la determinación de esta zona está basada en los estudios del DHN (2014), el cual considera un tsunami generado por un evento sísmico de 9.0 Mw. La segunda zona se encuentra en la playa de San Miguel, a nivel del pie del acantilado, esta zona se encuentra muy expuesta al sometimiento de un tsunami por ubicarse cerca al mar (Figura N°76).



Figura N°76. Zona expuesta al sometimiento de un tsunami. Tomada del trabajo del CISMID-FIC-UNI (2015)

7.2 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

El mapa de Microzonificación Geotécnica (ver MAPA 2 del ANEXO) presentado en esta tesis fue recopilado de los trabajos del CISMID-FIC-UNI realizados en los distritos de La Perla (2016) y San Miguel (2015), los cuales agrupan diferentes tipos de suelos según sus características geotécnicas que permita identificar zonas favorables y desfavorables para viviendas existentes y proyectadas del tipo convencional, en dichos trabajos se establecieron cuatro zonas:

✓ **Zona I**

En esta zona se encuentran los suelos conformados por grava aluvial de compacidad media a densa con matriz arenoso y/o arenoso arcilloso y se encuentran cubiertos superficialmente por una capa delgada de material fino como se muestra en la Figura N°77, esta zona presenta las mejores condiciones geotécnicas para la cimentación de edificaciones convencionales con una capacidad de carga admisible que varía entre 2 y 4 kg/cm².



Figura N°77. Calicata realizada en el distrito de San Miguel. (CISMID-FIC-UNI, 2015)

✓ **Zona II**

En la zona II se encuentran suelos arenosos de compacidad media a densa y limos y/o arcillas de consistencia media a dura como se muestra en la Figura N°78, presentan un espesor que varía en el rango de 3 y 11.8 metros, siendo la zona oeste la que presenta mayores potencias de este material y esta se va perdiendo en dirección al este. Por debajo de estos materiales se encuentra la grava aluvial; esta zona presenta condiciones geotécnicas favorables para la cimentación de edificaciones convencionales con una capacidad de carga que varía entre 1 y 2 kg/cm².



Figura N°78. Calicata realizada en el distrito de La Perla. (CISMID-FIC-UNI, 2015)

✓ **Zona IV**

En esta zona se encuentran los acantilados y son propensos al desprendimiento de materiales de suelos que lo conforman. El CISMID-FIC-UNI (2015) recomienda que desde el borde del talud hacia la ciudad (con una distancia aproximada de 65 metros) se evite la construcción de viviendas.

✓ **Zona V**

En la zona V se encuentran los materiales de relleno de desmonte, producto de la demolición de viviendas antiguas, además de gravas, arenas, finos y escombros de maderas y desechos; esta zona no es apta para habilitación urbana.

7.3 MAPA DE ISOPERIODOS

Las gráficas de las relaciones espectrales H/V muestran que el área de estudio presenta dos picos que podrían sugerir amplificaciones sísmicas para períodos cortos y para períodos largos; en base a esto, se elaboraron dos mapas de isoperíodos:

✓ **Mapa de isoperíodos T0 (períodos largos)**

El trabajo de Quispe (2021) explica la existencia de amplificaciones en los períodos largos en el distrito de San Miguel, además el informe del IGP (2021) también señala la existencia de estos y los relaciona con la presencia de estratos profundos de gran espesor de material aluvial; teniendo en cuenta esto, se definieron 4 zonas (ver MAPA 3 del ANEXO):

Zona A: Zona con la existencia de picos de períodos largos que varían entre 0.60 a 1.00 segundos.

Zona B: Zona con la existencia de picos de períodos largos que varían entre 1.00 a 1.30 segundos.

Zona C: Zona con la existencia de picos de períodos largos que varían entre 1.30 a 1.70 segundos.

Zona de relleno: En esta zona se encuentran suelos muy heterogéneos, puesto que se trata de material de relleno y sus valores de períodos largos varía entre 0.60 y 1.30 segundos.

Si observamos las zonas A, B y C es evidente la tendencia de valores de períodos largos mayores cuando se va en dirección oeste (zona C).

✓ **Mapa de isoperíodos T1 (periodos cortos)**

Se establecieron 3 zonas de periodos cortos (ver MAPA 4 del ANEXO):

Zona I: Zona con la existencia de picos de periodos cortos menores a 0.20 segundos, lo cual corresponde a un suelo rígido (CISMID-FIC-UNI, 2015).

Zona II: Zona con la existencia de picos de periodos cortos que varían entre 0.20 y 0.30 segundos, lo cual sugiere que se trata de suelos medianamente rígidos (CISMID-FIC-UNI, 2016).

Zona de relleno: En esta zona se encuentran suelos muy heterogéneos, puesto que se trata de material de relleno y sus valores de periodos cortos varía entre 0.10 y 0.35 segundos.

7.4 MAPAS DE VS30

Dado que el parámetro de caracterización dinámica del suelo Vs30 representa el promedio de las velocidades de ondas de corte de los primeros 30 metros medidos desde la superficie como se indicó en la Ecuación 6 y se encuentra en los códigos de clasificación de sitios, se elaboraron tres mapas que permiten agrupar estos valores de Vs30 en rangos que se han establecido según como se indicará a continuación:

✓ **Según el IBC**

La Tabla N°3 muestra la clasificación de sitios según el IBC (2006) y en este caso se ha establecido 3 zonas (ver MAPA 5 del ANEXO):

Suelo C: En esta zona se encuentran suelos muy densos con Vs30 que varían entre 360 y 650 m/s.

Suelo D: Suelos rígidos con Vs30 que varían entre 320 y 360 m/s.

Zona de relleno: En esta zona se encuentran suelos muy heterogéneos, puesto que se trata de material de relleno y sus Vs30 varían entre 340 y 520 m/s.

✓ **Según la norma peruana E-030**

La Tabla N°4 muestra la clasificación de sitios según la norma peruana E-030 (2018) y se han establecido 3 zonas (ver MAPA 6 del ANEXO):

Suelo S1: En esta zona se encuentran suelos muy rígidos con Vs30 que varían entre 500 a 650 m/s y se observa que los mayores valores se encuentran la zona este del distrito de San Miguel.

Suelo S2: Suelos intermedios con Vs30 que varían entre 300 y 500 m/s y se observa que los valores más bajos se encuentran en la zona central y sur del distrito de La Perla.

Zona de relleno: En esta zona se encuentran suelos muy heterogéneos, puesto que se trata de material de relleno y sus Vs30 varían entre 340 y 520 m/s.

✓ **Según Aguilar (2019)**

Como se mencionó en el Capítulo V, Aguilar et al. (2019) proponen una subdivisión del tipo de suelo S2 de la norma peruana E-030; con base en esto se establecieron 4 zonas (ver MAPA 7 del ANEXO):

Suelo S1: En esta zona se encuentran suelos muy rígidos con Vs30 que varían entre 500 a 650 m/s y se observa que los mayores valores se encuentran la zona este del distrito de San Miguel.

Suelo S2 A: Suelos intermedios con Vs30 que varían entre 350 y 500 m/s.

Suelo S2 B: Suelos intermedios con Vs30 que varían entre 300 y 350 m/s.

Zona de relleno: En esta zona se encuentran suelos muy heterogéneos, puesto que se trata de material de relleno y sus Vs30 varían entre 340 y 520 m/s.

7.5 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

El mapa de microzonificación sísmica se obtuvo a partir de la combinación de los mapas de Microzonificación Geotécnica, Isoperíodos y Vs30 de manera que se representen las características geotécnicas y dinámicas de los materiales en zonas delimitadas de forma íntegra. Para esta tesis se identificaron 5 zonas (ver MAPA 8 del ANEXO):

✓ **Zona I:** Zona que presenta materiales de suelo con Vs30 mayores a 450 m/s y menores a 700 m/s con una predominancia de suelos S1 según la norma peruana E-030, además con períodos cortos menores a 0.20 segundos, capas superficiales de material arenoso limoso con espesores menores a 3 metros y subyacente a esta se encuentra el material gravoso aluvial. Los espectros de respuesta obtenidos del análisis no lineal presentan amplificaciones

importantes para periodos estructurales entre 0.20 y 0.30 segundos; esta zona presenta las mejores condiciones geotécnicas y dinámicas para la cimentación de edificaciones convencionales.

- ✓ **Zona II A:** Zona que presenta materiales de suelo con valores de Vs30 entre 350 y 450 m/s (suelo S2 según la norma E-030), con una predominancia de periodos cortos menores a 0.20 segundos, capas superficiales de material arenoso limoso con espesores mayores a 3 metros y subyacente a esta se encuentra la grava aluvial. Presenta amplificaciones relativamente más altas para periodos mayores a 1 segundo.
- ✓ **Zona II B:** Zona que presenta materiales de suelo con Vs30 menores a 350 m/s (suelos S2 según la norma E-030), con periodos cortos menores a 0.20 segundos, con capas superficiales de material arenoso limoso con espesores mayores a 5 metros que pueden llegar hasta 11 metros (a diferencia de la zona II A) y subyacente a este se encuentra la grava aluvial, se encuentra principalmente en la zona central y sur del distrito de La Perla, cercano a la playa. Presenta amplificaciones relativamente más altas para periodos mayores a 1 segundo.
- ✓ **Zona IV:** Zona donde se encuentran los acantilados de la Costa Verde y presenta peligros naturales altos correspondientes a derrumbes. No es recomendable levantar edificaciones cerca a esta zona.
- ✓ **Zona V:** Zona donde se encuentra el material de desmonte traído de distintas partes de la ciudad, con Vs30 y periodos de vibración ambiental muy variables y además presenta peligro natural muy alto correspondientes a tsunamis; y no es una zona apta para la construcción de viviendas y/o edificaciones.

CONCLUSIONES

En esta tesis se presenta la Microzonificación Sísmica de los distritos de La Perla y San Miguel. Para este estudio se recopiló información geológica, geotécnica y geofísica, a la vez que se ejecutaron ensayos adicionales; del procesamiento de la información se obtuvieron resultados que permitieron delimitar los mapas producto de esta tesis. A continuación, se presentan las conclusiones que se derivaron de esta investigación:

Las características litológicas y geomorfológicas del área de estudio se deben principalmente a la influencia del río Rímac, donde a lo largo del tiempo los materiales acarreados se fueron depositando hasta formar el conglomerado de Lima. Se pueden encontrar distintos tipos de materiales los cuales se deben principalmente a los cambios meteorológicos.

Los peligros naturales que presenta el área de estudio fueron agrupados en 3 zonas; el primero corresponde a peligro bajo, el cual se encuentra en la mayor parte de la llanura aluvial; el segundo corresponde a peligro alto, y es debido a la presencia del acantilado de la Costa Verde que podría presentar derrumbes y caída de material suelto y; finalmente, el tercero corresponde a peligro muy alto, en el cual la zona oeste y la playa pueden presentar inundaciones por un posible tsunami.

Las exploraciones geotécnicas recopiladas del distrito de La Perla determinaron que está cubierta por capas de material arenoso arcilloso, que pueden llegar a tener espesores de 11 metros en la zona oeste del distrito; sin embargo, la potencia de este material disminuye en la dirección este. Subyacente a este material, se encuentra la grava aluvial, que pueden tener un espesor considerablemente grande (mayores a 100 metros). Asimismo, se pueden encontrar pequeños lentes de arena o arcilla intercalados en el conglomerado de Lima, los cuales pueden ser observados en los acantilados de la Costa Verde.

Las exploraciones geotécnicas realizadas en la zona nor-oeste del distrito de San Miguel determinaron que presenta depósitos de suelo conformados principalmente por grava aluvial, la cual forma parte del conglomerado de Lima; estos suelos presentan características físicas y dinámicas muy competentes para la cimentación de estructuras convencionales.

Las razones espectrales H/V muestran la presencia de picos de periodo corto que, en la mayoría de los casos, son menores a 0.20 segundos, lo cual sugiere que se trata de suelos rígidos. Además, se evidencia la presencia de picos de periodos largos que van desde 0.60 a 1.70 segundos, estos pueden estar asociados a la presencia de depósitos de suelos profundos de gran potencia como se señalan en los estudios del IGP (2021).

Los mapas de Vs30 indican que los suelos más rígidos se encuentran en la zona nor-este del área de estudio (suelo S1), lo cual es coherente con la ausencia de material arenoso arcilloso y la abundancia de material gravoso. Asimismo, se puede observar que los suelos más blandos (suelos S2) se encuentran en la zona central del distrito de La Perla y en zonas cercanas al acantilado de la Costa Verde. En esta zona, se evidencia material arenoso arcilloso, que presentan grandes potencias en la zona oeste del área de estudio; esto es concordante con la clasificación propuesta por Aguilar et al. (2019).

Existe una clara tendencia de los perfiles sísmicos Vs tanto de la información recopilada como la obtenida en este estudio. Sin embargo, el perfil recopilado AM-04_SM presenta una forma diferente a esta tendencia, que también se observa en las curvas de dispersión de los perfiles. Es por ello, que este perfil no ha sido utilizado en los análisis de respuesta sísmica.

Los análisis de sensibilidad realizados en la respuesta sísmica de los perfiles de suelo del presente estudio determinaron que el valor de coeficiente de uniformidad (C_u) representativo para las gravas del conglomerado de Lima siguiendo el modelo de Menq (2013) es $C_u=20$, el cual presenta resultados más realistas tanto en los espectros de respuesta en superficie como en las deformaciones máximas estimadas a lo largo de todo el perfil.

Los resultados del análisis lineal equivalente presentan buenas aproximaciones al comportamiento no lineal del suelo. Esto se debe a que mediante las iteraciones realizadas en el análisis lineal equivalente se estimaron correctamente los módulos de corte y amortiguamientos representativos para cada tipo de material.

Los espectros de respuesta en superficie muestran que las aceleraciones máximas del suelo (PGA) siguiendo un análisis no lineal se encuentran entre 0.40 y 0.56 g, valores que son menores a los estimados en el espectro de peligro uniforme para suelo tipo C, cuyo PGA calculado fue 0.75 g; siendo los primeros

valores más realistas puesto que se obtuvieron a partir de un análisis numérico teniendo en cuenta los efectos de sitio.

Los análisis de respuesta de sitio estimados muestran que el perfil que se encuentra en la zona este del área de estudio (AM-03_SM), la más rígida, presenta amplificaciones importantes en periodos estructurales entre 0.20 y 0.30 segundos; y posteriormente, presenta un decaimiento para periodos mayores a 0.30 segundos. Por otro lado, los perfiles AM-03_LP y AM-04_LP presentan amplificaciones relativamente más altas para periodos mayores a 1 segundo; esto puede deberse a la presencia de materiales flexibles de gran espesor ubicados a grandes profundidades. Los perfiles AM-04_SM y AM-05_SM presentan un comportamiento intermedio entre los casos analizados anteriormente.

El mapa de Microzonificación Sísmica de los distritos de La Perla y San Miguel presenta 5 zonas; la zona I es la que tiene las mejores condiciones geotécnicas y dinámicas para el levantamiento de edificaciones. La zona II A presenta suelos de mediana rigidez y se encuentran capas de material arenoso arcilloso menores a 3 metros de espesor. La zona II B presenta suelos relativamente más blandos y presentan capas de material arenoso arcilloso de hasta 11 metros de espesor, la cual puede ser importante en el diseño de cimentaciones superficiales. Tanto la zona II A como II B presentan amplificaciones relativamente más altas debido a la presencia de materiales flexibles a grandes profundidades. La zona IV está comprendida por los acantilados de San Miguel y la Perla y presenta peligros por derrumbe y caída de material suelto y; finalmente la zona V comprende la playa que está conformada por material de desmonte traído de la ciudad de Lima, y no es apto para la construcción de edificaciones.

Los resultados obtenidos del presente estudio fueron validados al comparar los espectros de respuesta de sismos de intermedia magnitud. Estos sismos fueron registrados en estaciones ubicadas en cada zona definida en la microzonificación como se puede apreciar en las Figuras 63, 65, 67, 69, 71 y 73. Las respuestas de color naranja corresponden a una estación ubicada en la zona III (mayor aceleración espectral), la de color amarillo en la zona II y las verdes a la zona I (menor aceleración espectral).

RECOMENDACIONES

El análisis de peligro sísmico probabilístico de la presente tesis fue basado en el trabajo de Roncal (2017); sin embargo, es necesario realizar una actualización de las características de las fuentes sismogénicas con la información más reciente, además es importante considerar para posteriores trabajos modelamientos que incluyan los efectos de subducción de las placas tectónicas.

Es recomendable para posteriores trabajos de tesis, realizar análisis estadísticos para determinar las leyes de atenuación que presenten un mejor ajuste al mecanismo sismotectónico en el Perú, teniendo en cuenta que en la actualidad existe un gran avance en el desarrollo de leyes de atenuación.

Los efectos de los periodos cortos de las relaciones espectrales H/V han sido muy bien estudiados, sin embargo, aún existe una incertidumbre con los efectos de los periodos largos, lo cual amerita realizar más estudios en otras zonas que presenten estos periodos y poder relacionarlos con los depósitos de suelo profundos de gran espesor.

Los estudios de microzonificación sísmica requieren de una gran cantidad de información y de muchos recursos para poder ejecutar ensayos en caso de que éstos se encuentren escasos. Por esta razón, la recopilación de información es un paso preliminar importante para realizar campañas de exploración que completen los vacíos de información en el área de interés.

Es recomendable que los estudios de microzonificación sísmica presenten mapas de Vs30, de manera que esta pueda ser complementada con los mapas de isoperíodos y tener una información más completa y una mejor estimación de los efectos de sitio del área de interés; además la importancia de realizar el análisis de respuesta conlleva a un mejor entendimiento del comportamiento dinámico del suelo en cada zona definida.

Como se mencionó anteriormente, el modelo de Menq (2003) presenta curvas de degradación para suelos granulares que fueron basadas en materiales con coeficientes de uniformidad menores a 50; sin embargo, las gravas de Lima presentan valores de Cu mayores a este valor. Por los resultados del análisis de sensibilidad realizados, se recomendaría usar valores de Cu cercanos a 20 siguiendo el modelo de Menq, dada la complejidad de realizar ensayos dinámicos de laboratorio en gravas.

Los escenarios sísmicos deben seleccionarse según el mecanismo que predomina en el área de estudio. En esta tesis se seleccionaron sismos cuyo origen sea de subducción de placas tectónicas; sin embargo, para otros estudios no necesariamente será así, y se podrían seleccionar sismos de origen continental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, Z., Tarazona, J., Vergaray, L. y Barrantes, J. (2019). Site response analysis and its comparison with the peruvian seismic design spectrum. *TECNIA*, 29(2), 91-97.
<https://revistas.uni.edu.pe/index.php/tecnia/article/view/700/1102>
- Aki, K. (1957). Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415-456.
<https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/43280/1/Aki.pdf>
- Aki, K. (1965). Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log_{10}N=a-bm$ and Its Confidence Limits. *Bulletin of Earthquake Research*. 43(2), 237-239.
- ASTM International. (2006). *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation* (D5777). ASTM.
http://gis.proviasnac.gob.pe/expedientes/UGE/Carretera%20Central/04.%20Geologia%20y%20Geotecnia/Geofisica/ANEXO%20XI_NORMAS/ASTM-D5777_ANEXO.pdf
- Astroza, R., Iturriaga, A., Ureta, S., Carrasco, M. y Astroza, M. (2019). Curvas de atenuación de intensidades para Chile considerando grandes terremotos ocurridos entre 1906 y 2016. [Presentación de artículo]. *Actas del XII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica*. Valdivia, Chile.
- Bard, P. (1998). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? En Iruka, Kudo, Okada & Sasatani (Eds.) *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion* (pp. 1251- 1279). CRC Press.
- Bastías, N., Montalva, G., Leyton, F., Saez, E., Ruz, F., & Troncoso, P. (2015). Evaluation of ground motion prediction equations (GMPEs) for Chile subduction. En D. Manzanal y O. A. Sfriso (Eds.) From Fundamentals to Applications in Geotechnics. *Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (p. 2965 – 2972). IOS Press.

- Burton, I., Kates, R. W., & White, G. F. (1978). The environment as hazard. *Physical Geography: Earth and Environment*, 3(4), 600-603.
<https://doi.org/10.1177/030913337900300408>
- Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57(8), 1408-1418.
<https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7278>
- Castillo, J. y Alva, J. (1993). Peligro sísmico en el Perú. [Presentación de artículo]. *Actas del VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones*. Lima, Perú.
https://www.jorgealvahurtado.com/files/redacis15_a.pdf
- Cho, I., Tada, T. y Shinozaki, Y. (2004). A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms. *Geophysics*, 69(5), 1535–1551. <https://doi.org/10.1190/1.1836827>
- CISMID (2015). *Estudio de microzonificación sísmica y análisis de riesgo en la zona de estudio ubicada en el distrito de San Miguel* estudios de diagnóstico del riesgo. <https://www.gob.pe/institucion/programa-nuestras-ciudades/informes-publicaciones/375282-estudios-de-microzonificacion>
- CISMID (2016). *Estudio de microzonificación sísmica y análisis de riesgo en la zona de estudio ubicada en el distrito de La Perla* estudios de diagnóstico del riesgo. <https://www.gob.pe/institucion/programa-nuestras-ciudades/informes-publicaciones/375282-estudios-de-microzonificacion>
- Conti, R., Angelini, M. y Licata, V. (2020). Nonlinearity and strength in 1D site response analyses: A simple constitutive approach. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 4629–4657. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00873-5>
- Convenio UNI-FONDES. (2021). Estudio geotécnico sísmico de la estabilidad del talud del acantilado de la Costa Verde, considerando la amenaza por tsunami y el comportamiento estructural de las edificaciones ubicadas sobre el acantilado. *Manuscrito en preparación*.
- Cornell, C. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583-1606.
https://courses.washington.edu/ess502/Cornell_1968.pdf

- Flores, H. (2004). Método SPAC: *Una alternativa para la estimación de modelos de velocidades en el Valle de México* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000330876
- Gonzales, C., Sifuentes, A., Lázares, F., Quispe, S., & Huerta, K. (2020). Vs profiles, H/V spectra and geotechnical classification as proxies of the soil dynamic behavior in Lima, Peru. [Presentación de artículo]. *17th World Conference on Earthquake Engineering* (Paper No. C003940). Sendai, Japón. <https://www.cismid.uni.edu.pe/wp-content/uploads/2021/10/1g-0017.pdf>
- Groholski, D. R., Hashash, Y. M. A., Kim, B., Musgrove, M., Harmon, J. y Stewart, J. P. (2016). Simplified model for small-strain nonlinearity and strength in 1D seismic site response analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(9), 04016042-1 - 04016042-14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001496](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001496)
- Gutenberg, B. y Richter, C. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 34(4), 185-188. <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>
- Hashash, Y. (2020). *DEEPSOIL 7.0 Nonlinear and equivalent linear seismic site response of one-dimensional soil columns*. https://deepsoil.cee.illinois.edu/Files/DEEPSOIL_User_Manual_v7.pdf
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018). *Resultados definitivos de los censos nacionales 2017*. INEI. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1583/
- Instituto Geofísico del Perú. (2001). *Catálogo sísmico del Perú 1471 – 1982: Versión revisada y actualizada*. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/789>
- Instituto Geofísico del Perú. (2014). *Re-evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú*. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/783>
- Instituto Geofísico del Perú. (2021). *Evaluación geofísica de los acantilados de la Costa Verde, distrito de San Miguel*. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/4996>

- International Code Council (2006). *International building code, structural and fire and life-safety provisions (seismic, wind, accessibility, egress, occupancy and roof codes)*. Whittier, CA.
- Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Clarendon Press.
<http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/45794/1/Soil%20Behaviour%20in%20Earthquake%20Geotechnics%20.pdf>
- Jia, J. (2017). Site-response analysis in geotechnical earthquake engineering. En *Soil dynamics and foundation modeling* (pp. 109–165). Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-40358-8_3
- Kale, O., y Akkar, S. (2013). A new procedure for selecting and ranking ground-motion prediction equations (GMPEs): The Euclidean distance-based ranking (EDR) method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A), 1069-1084. <https://doi.org/10.1785/0120120134>
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- Kuroiwa, J. (1991, del 25 al 28 de febrero). *Microzonificación y su aplicación al planeamiento urbano para la mitigación de desastres* [conferencia]. Simposio Internacional de Seguridad Sísmica en la Vivienda Económica.
<https://www.eird.org/bibliovirtual/riesgo-urbano/pdf/spa/doc1510/doc1510.htm>
- Lázares, F. (2018). *Redes acelerográficas en el Perú* [conferencia]. Seminario Internacional de Ingeniería Geotécnica Sísmica. Lima, Perú.
- Linares, G. (2005). *Introducción y aplicación del método de sísmica de microtremores en áreas urbanas* [Tesis de título profesional]. Universidad Simón Bolívar.
- Maggiolo, O. (1969). *Características del suelo de cimentación de Lima central (y alrededores), aspectos geológicos generales y el comportamiento de los suelos ante los sismos en relación a las estructuras*. [Presentación de artículo]. I Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Lima, Perú.

- Marina de Guerra del Perú (2014). *Carta de inundación en caso de tsunami. La Punta - Callao*. [Mapa]. Sistema de información para la gestión del riesgo del desastre. <http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/4538>
- Matasovic, N., y Vucetic, M. (1993). Cyclic characterization of liquefiable sands. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 119(11), 1805–1822. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:11\(1805\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:11(1805))
- Masing, G. (1926). Eigenspannungen und Verfertigung beim Messing. [Presentación de artículo]. *2nd International Congress on Applied Mechanics*. Zurich, Suiza.
- McGuire, R. y Arabasz, W. (1990). An introduction to probabilistic seismic hazard analysis. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, 1(12), 333-354. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802785.ch12>
- Menq, F. (2003). *Dynamic properties of sandy and gravelly soils*. [Tesis de doctorado, Universidad de Texas]. Repositorio de la Universidad de Texas. <https://repositories.lib.utexas.edu/items/2a7a8fec-45f1-4c81-920d-b1af79679e2e>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2016). Reglamento Nacional de Edificaciones (Norma Técnica de Edificaciones E.030 Diseño Sismorresistente). El Peruano. <https://museos.cultura.pe/sites/default/files/item/archivo/Norma%20t%C3%A9cnica%20E.030%20Dise%C3%B1o%20sismorresistente.pdf>
- Montalva, G. (2019). *Peligro sísmico y microzonificación, caracterización de terrenos para diseño sísmico* [conferencia] Curso de Especialización Internacional del Centro de Capacitación Minera (CECAMIN) y Organización Especialista en Formación INGEOMINE. Lima, Perú.
- Moya, L., Gonzales, C., Díaz, M., Adriano, B., Mas, E., Zavala, C., Koshimura, S. y Yamazaki, F. Concytec-World Bank Project: Machine Learning and Earth Observation Technologies for Disaster Mitigation (2021, del 27 de setiembre al 2 de octubre). *17th World Conference on Earthquake Engineering*, Sendai, Japan. https://www.researchgate.net/publication/354874034_Concytec-

[World Bank Project Machine Learning and Earth Observation Technologies for Disaster Mitigation](#)

Nakamura, Y. (1989). A method of dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute*, 30(1), 25-33. https://www.sdr.co.jp/papers/hv_1989.pdf

Nakamura, Y. (2008, del 12 al 17 de octubre). On the H/V spectrum [conferencia]. *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Bejing, China. https://www.sdr.co.jp/papers/14wcee/14wcee_hv.pdf

Park, C., Miller, R. y Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics*, 64(3), 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>

Pastor, B., Calderón, D. y Gonzales, C. (2022). Evaluation of the seismic response using the random vibration theory in three soil profiles of Lima, Peru. *TECNIA*, 32(2), 21–37. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v32i2.1420>

Phillips, C. y Hashash, Y. (2009). Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(5), 727–734. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.12.008>

Pinilla, D. (2019). *Análisis de la influencia del catálogo sísmico en la estimación de la recurrencia de terremotos* [Tesis de título profesional]. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

Pitilakis, K., Riga, E. y Anastasiadis, A. (2013). New code site classification, amplification factors, and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(3), 925–966. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9429-4>

Pulido, N., Aguilar, Z., Tavera, H., Chlieh, M., Calderón, D., Sekiguchi, T. y Yamazaki, F. (2015). Scenario source models and strong ground motion for future mega-earthquakes: Application to Lima, Central Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 368–386. <https://doi.org/10.1785/0120140098>

- Quispe, S. (2015). *Evaluation of local site amplification in Lima, Peru using earthquake ground motion records* [Tesis de doctorado]. Instituto Tecnológico de Tokio
- Quispe, S., Aguilar, Z., & Lázares, F. (2018, del 23 al 27 de abril). Los depósitos de grava presentan amplificaciones importantes en períodos largos, ¿una realidad? [Presentación de artículo]. *XXVII Congreso Nacional de Ingeniería Civil*. Lima, Perú.
- Quispe, S., Lázares, F. y Aguilar, Z. (2019). Explicación de por qué los depósitos de grava en la ciudad de Lima, Perú presentan amplificaciones importantes en períodos largos y su implicancia en la Norma Técnica Peruana Sismorresistente. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*. <https://doi.org/10.3233/STAL190265>
- Reiter, L. (1990). *Earthquake hazard analysis: Issues and insights*. Columbia University Press.
- Richter, C. (1958). *Elementary seismology*. W.H.Freeman & Company.
- Roncal, M. (2017). *Determinación del peligro sísmico probabilístico en el territorio nacional y elaboración de aplicativo web* [Tesis de título profesional]. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Scherbaum, F., Delavaud, E. y Riggelsen, C. (2009). Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(6), 3234-3247. <https://doi.org/10.1785/0120080347>
- Silgado, E. (1969). Sismicidad de la región occidental de la América del Sur entre los paralelos 2° y 18° latitud sur. *Primer Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica*. Lima, Perú.
- Silgado, E. (1973). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú 1955-1970. *Geofísica Panamericana*, 2(1), 179-243.
- Silgado, E. (1978). *Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974)*. Instituto de Geología y Minería.
- Silgado, E. (1992). *Investigación de sismicidad histórica en la América del Sur en los siglos XVI, XVII, XVIII y XIX*. Talleres ONERN.

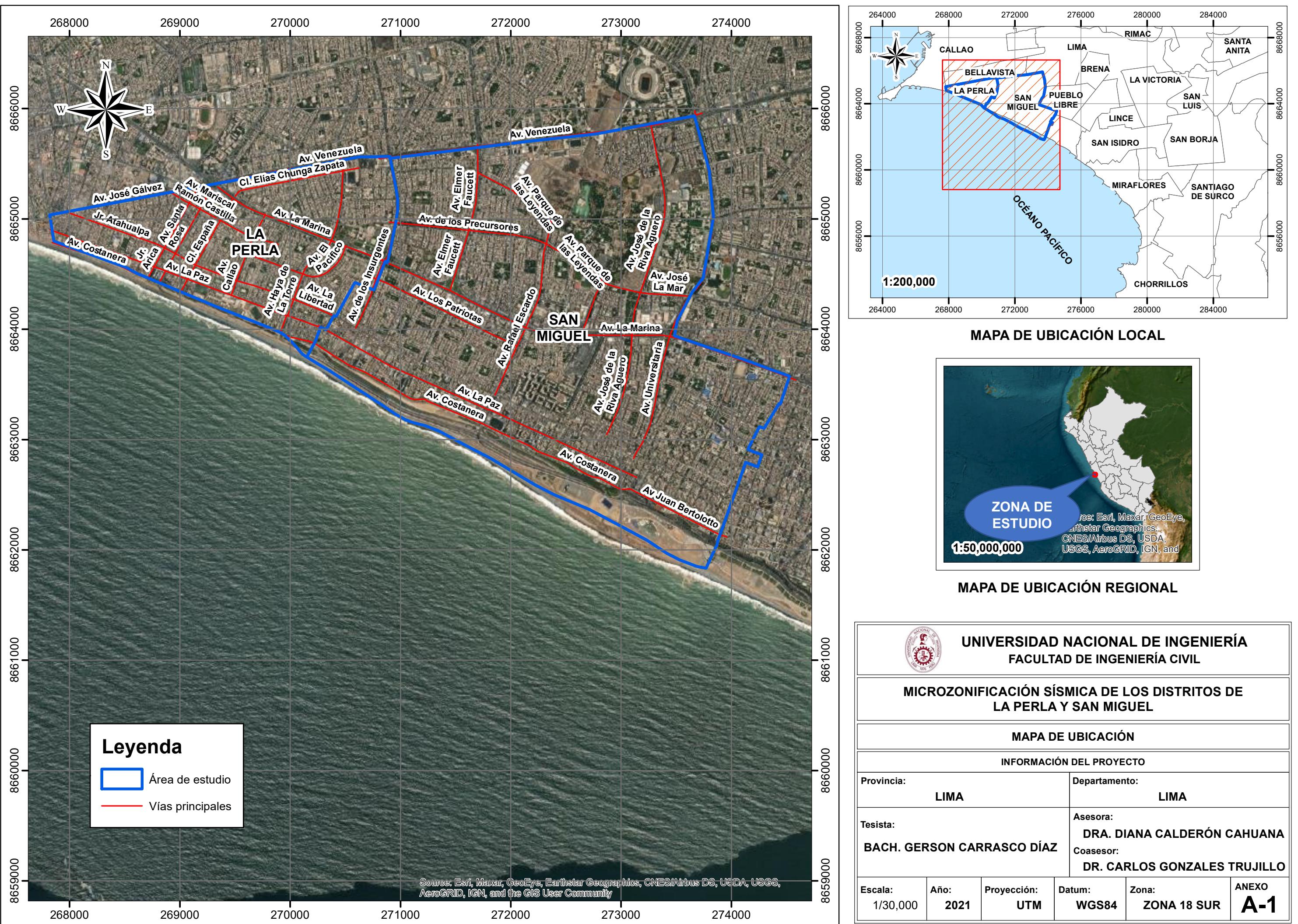
- Sitharam, T., James, N. y Kolathayar, S. (2018). Local site effects for seismic zonation. En *Comprehensive seismic zonation schemes for regions at different scales* (pp. 75–108). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89659-5_5
- Soto, J. (2016). *Evaluación de espectros de respuesta mediante el análisis de respuesta de sitio unidimensional en siete distritos de Lima* [Tesis de título profesional]. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Tada, T., Cho, I. y Shinozaki, Y. (2007). Beyond the SPAC method: Exploiting the wealth of circular-array methods for microtremor exploration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(6), 2080–2095. <https://doi.org/10.1785/0120070058>
- Tavera, H. y Buorn, E. (1998). Sismicidad y sismotectónica de Perú. *Física de la Tierra*, 10, 187-219. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/822>
- Tavera, H. (2011). *Estudio de peligro sísmico para el Cerro Tamboraque, distrito de San Mateo – provincia de Huarochirí*. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/OTROS/Estudio%20de%20peligro%20sísmico%20Cerro%20Tamboraque.pdf>
- Toribio, J. (1904). Sinopsis de los temblores y volcanes del Perú. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*. 3(1), 321-349.
- Verdugo, R. (2019). Seismic site classification. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 124, 317–329. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.045>
- Villegas, J., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J. y Nocquet, J. (2016). Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7371-7394. <https://doi.org/10.1002/2016JB013080>
- Weichert, D. (1980). Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(4), 1337-1346. <https://www.resolutionmineis.us/sites/default/files/references/weichert-1980.pdf>

- Youngs, R., Chiou, S., Silva, W. y Humphrey, J. (1997). Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58-73. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.58>
- Zhang, J., Andrus, R. y Juang, C. (2005). Normalized shear modulus and material damping ratio relationships. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4), 453–464. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:4\(453\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:4(453))
- Zhao, J., Jiang, F., Shi, P., Xing, H., Huang, H., Hou, R., Zhang, Y., Yu, P., Lan, X., Rhoades, D., Somerville, P., Irikura, K. y Fukushima, Y. (2016). Ground motion prediction equations for subduction slab earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(4), 1-17. <https://doi.org/10.1785/0120150056>
- Zhao, J., Jiang, F., Shi, P., Xing, H., Huang, H., Hou, R., Zhang, Y., Yu, P., Lan, X., Rhoades, D., Somerville, P., Irikura, K., & Fukushima, Y. (2016). Ground motion prediction equations for subduction slab earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(1), 329–346. <https://doi.org/10.1785/0120150107>
- Zhao, J., Liang, X., Jiang, F., Xing, H., Zhu, M., Hou, R., Zhang, Y., Lan, X., Rhoades, D., Irikura, K., Fukushima, Y. y Somerville, P. (2016). Ground motion prediction equations for subduction interface earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(1), 347–363. <https://doi.org/10.1785/0120150110>

ANEXOS

Anexo A.....	140
Anexo A-1: Mapa de ubicación	141
Anexo A-2: Tablas	142
Anexo B.....	170
Anexo B-1: Mapa de Geología Regional.....	171
Anexo B-2: Mapa de Geología Local	172
Anexo B-3: Mapa de Geomorfología.....	173
Anexo C.....	174
Anexo C-1: Mapa de ubicación de sondajes	175
Anexo C-2: Mapa de tipos de suelos a 1 m.....	176
Anexo C-3: Mapa de tipos de suelos a 2.5 m.....	177
Anexo D.....	178
Anexo D-1: Mapa de ubicación de mediciones puntuales de microtremores....	179
Anexo D-2: Espectros H/V	180
Anexo D-3: Mapa de ubicación de ensayos de refracción sísmica.....	194
Anexo D-4: Dromocrónicas	195
Anexo D-5: Perfiles Vp refracción sísmica	199
Anexo D-6: Mapa de ubicación de ensayos MASW	203
Anexo D-7: Curvas de dispersión MASW	204
Anexo D-8: Perfiles Vs MASW	210
Anexo D-9: Mapa de ubicación de arreglos de microtremores	216
Anexo D-10: Curvas de dispersión – arreglos de microtremores	217
Anexo D-11: Perfiles Vs profundos – arreglos de microtremores	220
Anexo D-12: Verificación de perfiles Vs profundos estimados	223
Anexo E.....	226
Anexo E-1: Mapa de ubicación de perfiles sísmicos	227
Anexo E-2: Escenarios sísmicos.....	228
Anexo E-3: Respuesta de sitio.....	233
Anexo E-4: Perfil de suelo	253
Mapas	254
Mapa 1: Mapa de Peligros Naturales	255
Mapa 2: Mapa de Microzonificación Geotécnica.....	256
Mapa 3: Mapa de isoperíodos T0.....	257
Mapa 4: Mapa de isoperíodos T1.....	258
Mapa 5: Mapa de Vs30 IBC	259
Mapa 6: Mapa de Vs30 Norma E-030	260
Mapa 7: Mapa de Vs30 Aguilar (2019).....	261
Mapa 8: Mapa de Microzonificación Sísmica	262

ANEXO A



ANEXO A-2: TABLAS

Tabla N°19. Ubicación de calicatas recopiladas

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Coordenadas UTM		Profundidad (m)	Nivel freático
				Este (m)	Norte (m)		
C-01 LP ⁽¹⁾	E 01	La Perla	2003	269219	8664564	3.15	N.E.
C-02 LP ⁽¹⁾	E 03	La Perla	1994	270111	8664162	8	N.E.
C-03 LP ⁽¹⁾	E 04	La Perla	2002	269017	8664827	9	N.E.
C-04 LP ⁽¹⁾	E 05	La Perla	2002	269134	8664916	7.6	N.E.
C-05 LP ⁽¹⁾	E 06	La Perla	1990	270244	8663874	4	N.E.
C-06 LP ⁽¹⁾	E 07	La Perla	2003	270978	8665289	5	N.E.
C-07 LP ⁽¹⁾	E 08	La Perla	1999	267845	8665017	7.3	N.E.
C-08 LP ⁽¹⁾	E 09	La Perla	1999	268114	8664941	5	N.E.
C-09 LP ⁽¹⁾	E 10	La Perla	1970	269108	8664461	5	N.E.
C-10 LP ⁽¹⁾	C 01	La Perla	2004	269353	8664433	4	N.E.
C-11 LP ⁽¹⁾	C 02	La Perla	2004	268825	8664443	4	N.E.
C-12 LP ⁽¹⁾	C 03	La Perla	2004	268547	8664960	4	N.E.
C-13 LP ⁽¹⁾	C 04	La Perla	2004	269888	8665203	4	N.E.
C-14 LP ⁽¹⁾	C 05	La Perla	2004	270506	8665261	3.8	N.E.
C-15 LP ⁽¹⁾	S-1	La Perla	2013	742603	8664453	14	N.E.
C-16 LP ⁽¹⁾	S-3	La Perla	2013	742593	8664507	10	N.E.
C-17 LP ⁽¹⁾	S-5	La Perla	2013	742738	8664525	10	N.E.
C-18 LP ⁽¹⁾	C-01	La Perla	2016	270682	8665099	3.1	N.E.
C-19 LP ⁽¹⁾	C-02	La Perla	2016	269425	8664795	3	N.E.
C-20 LP ⁽¹⁾	C-03	La Perla	2016	270879	8665445	3.1	N.E.
C-21 LP ⁽¹⁾	C-04	La Perla	2016	270479	8665416	3	N.E.
C-22 LP ⁽¹⁾	C-05	La Perla	2016	270072	8664775	3.2	N.E.
C-23 LP ⁽¹⁾	C-06	La Perla	2016	269601	8664330	3	N.E.
C-24 LP ⁽¹⁾	C-07	La Perla	2016	270397	8664460	3.1	N.E.
C-25 LP ⁽¹⁾	C-08	La Perla	2016	269560	8665231	3.2	N.E.
C-26 LP ⁽¹⁾	C-09	La Perla	2016	270052	8665136	3.1	N.E.
C-27 LP ⁽¹⁾	C-10	La Perla	2016	270732	8664629	3	N.E.
C-01 SM ⁽²⁾	E01	San Miguel	2003	270224	8663874	4	N.E.
C-02 SM ⁽²⁾	E03	San Miguel	2003	271399	8664285	6.7	N.E.
C-03 SM ⁽²⁾	E04	San Miguel	2003	271553	8663354	3	N.E.
C-04 SM ⁽²⁾	E05	San Miguel	2003	271722	8664130	5	N.E.
C-05 SM ⁽²⁾	E06	San Miguel	2003	271804	8665345	3	N.E.
C-06 SM ⁽²⁾	E07	San Miguel	2003	272055	8664801	5.2	N.E.
C-07 SM ⁽²⁾	E08	San Miguel	2003	272327	8665689	2.5	N.E.
C-08 SM ⁽²⁾	E09	San Miguel	2003	272354	8662879	4.5	N.E.
C-09 SM ⁽²⁾	E10	San Miguel	2003	272523	8662964	5	N.E.
C-10 SM ⁽²⁾	E11	San Miguel	2003	272722	8662872	5	N.E.
C-11 SM ⁽²⁾	E12	San Miguel	2003	272562	8663288	4.5	N.E.
C-12 SM ⁽²⁾	E13	San Miguel	2003	272342	8664333	3	N.E.
C-13 SM ⁽²⁾	E14	San Miguel	2003	273304	8662489	6.5	N.E.
C-14 SM ⁽²⁾	E15	San Miguel	2003	273369	8662677	6	N.E.
C-15 SM ⁽²⁾	E16	San Miguel	2003	273444	8662516	3.2	N.E.
C-16 SM ⁽²⁾	E17	San Miguel	2003	273573	8662706	5	N.E.
C-17 SM ⁽²⁾	E18	San Miguel	2003	273774	8662238	4	N.E.
C-18 SM ⁽²⁾	E19	San Miguel	2003	273282	8665846	2.2	N.E.
C-19 SM ⁽²⁾	E20	San Miguel	2003	273668	8665936	6	N.E.
C-20 SM ⁽²⁾	C01	San Miguel	2003	270751	8663877	3.1	N.E.
C-21 SM ⁽²⁾	C02	San Miguel	2003	270985	8665272	5	N.E.
C-22 SM ⁽²⁾	C03	San Miguel	2003	272237	8664814	2.6	N.E.
C-23 SM ⁽²⁾	C04	San Miguel	2003	273127	8664303	3.05	N.E.

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Coordenadas UTM		Profundidad (m)	Nivel freático
				Este (m)	Norte (m)		
C-24 SM ⁽²⁾	M135: C-1	San Miguel	1987	273863	8662769	2.8	N.E.
C-25 SM ⁽²⁾	M427: C-1	San Miguel	1993	272413	8663998	4	N.E.
C-26 SM ⁽²⁾	M922: C-3	San Miguel	1997	271307	8664895	6	N.E.
C-27 SM ⁽²⁾	M1055: C-3	San Miguel	1998	272655	8664118	5	N.E.
C-28 SM ⁽²⁾	M1102: C-1	San Miguel	1998	270887	8663711	3	N.E.
C-29 SM ⁽²⁾	M1138: C-3	San Miguel	1998	272243	8664169	6.3	N.E.
C-30 SM ⁽²⁾	M1141: C-1	San Miguel	1998	270951	8663739	4	N.E.
C-31 SM ⁽²⁾	M1162: C-1	San Miguel	1998	272198	8663958	2.6	N.E.
C-32 SM ⁽²⁾	M1281: C-1	San Miguel	1999	272061	8664001	4.3	N.E.
C-33 SM ⁽²⁾	M1331: C-2	San Miguel	1999	271847	8663311	3.9	N.E.
C-34 SM ⁽²⁾	M1753: C-2	San Miguel	2002	273635	8663354	4	N.E.
C-35 SM ⁽²⁾	M1781: C-1	San Miguel	2002	271389	8664241	3	N.E.
C-36 SM ⁽²⁾	M1784: C-2	San Miguel	2002	270785	8663878	5.2	N.E.
C-37 SM ⁽²⁾	M1917: C-1	San Miguel	2003	273739	8662392	6	N.E.
C-38 SM ⁽²⁾	M2363: C-3	San Miguel	2005	273648	8662293	4	N.E.
C-39 SM ⁽²⁾	M2462: T-1	San Miguel	2006	273853	8662142	44	N.E.
C-40 SM ⁽²⁾	M2486: C-1	San Miguel	2006	273756	8662243	4	N.E.
C-41 SM ⁽²⁾	M2590: C-2	San Miguel	2006	272458	8663484	6	N.E.
C-42 SM ⁽²⁾	M2656: C-1	San Miguel	2007	273837	8662116	7	N.E.
C-43 SM ⁽²⁾	M2661: C-2	San Miguel	2007	273310	8662576	5	N.E.
C-44 SM ⁽²⁾	M2662: C-2	San Miguel	2007	271780	8664102	5	N.E.
C-45 SM ⁽²⁾	M2934: C-4	San Miguel	2008	272477	8663291	4	N.E.
C-46 SM ⁽²⁾	M2934: C-20	San Miguel	2008	272336	8663295	6	N.E.
C-47 SM ⁽²⁾	M2934: C-28	San Miguel	2008	272183	8663446	5	N.E.
C-48 SM ⁽²⁾	M3412: C-2	San Miguel	2010	271063	8663995	5	N.E.
C-49 SM ⁽²⁾	M3487: C-1	San Miguel	2010	271164	8663447	6	N.E.
C-50 SM ⁽²⁾	M3497: C-1	San Miguel	2010	270864	8663537	7	N.E.
C-51 SM ⁽²⁾	M3556: C-1	San Miguel	2010	272927	8663903	13	N.E.
C-52 SM ⁽²⁾	M3641: C-1	San Miguel	2010	273816	8662213	7	N.E.
C-53 SM ⁽²⁾	M3881: C-2	San Miguel	2011	273646	8664369	7	N.E.
C-54 SM ⁽²⁾	M3923: C-1	San Miguel	2012	270592	8663676	11	N.E.
C-55 SM ⁽²⁾	RC: C-1	San Miguel	2006	272104	8663009	4	N.E.
C-56 SM ⁽²⁾	C-3	San Miguel	2013	270909	8663619	13	N.E.
C-57 SM ⁽²⁾	E03	San Miguel	2010	270663	8663681	4	N.E.
C-58 SM ⁽²⁾	06-286: C-8	San Miguel	2006	272558	8663431	5	N.E.
C-59 SM ⁽²⁾	C-01	San Miguel	2015	271128	8663632	3	N.E.
C-60 SM ⁽²⁾	C-02	San Miguel	2015	270571	8664150	3	N.E.
C-61 SM ⁽²⁾	C-03	San Miguel	2015	271747	8663584	3	N.E.
C-62 SM ⁽²⁾	C-04	San Miguel	2015	271855	8664577	3	N.E.
C-63 SM ⁽²⁾	C-05	San Miguel	2015	271266	8664605	3	N.E.
C-64 SM ⁽²⁾	C-06	San Miguel	2015	271107	8665218	3	N.E.
C-65 SM ⁽²⁾	C-07	San Miguel	2015	273773	8662770	3	N.E.
C-66 SM ⁽²⁾	C-08	San Miguel	2015	272949	8663292	3	N.E.
C-67 SM ⁽²⁾	C-09	San Miguel	2015	274390	8663449	3	N.E.
C-68 SM ⁽²⁾	C-10	San Miguel	2015	273430	8664365	3	N.E.
C-69 SM ⁽²⁾	C-11	San Miguel	2015	271888	8665437	3	N.E.
C-70 SM ⁽²⁾	C-12	San Miguel	2015	273361	8665611	3	N.E.
C-71 SM ⁽²⁾	C-13	San Miguel	2015	272865	8662668	3	N.E.
C-72 SM ⁽²⁾	C-14	San Miguel	2015	273578	8662336	2	N.E.
C-73 SM ⁽²⁾	C-15	San Miguel	2015	273609	8662236	3	N.E.
C-74 SM ⁽²⁾	C-16	San Miguel	2015	273807	8662076	3.5	N.E.
C-75 SM ⁽³⁾	C-1	San Miguel	2021	273580	8662288	15	N.E.

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)
- (2) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ZONAS UBICADAS EN LOS DISTRITOS DE: SAN JUAN DE MIRAFLORES, SANTA ROSA, SAN MIGUEL (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), CARMEN DE LA LEGUA REYNOSO (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO). (CISMID, 2015)
- (3) Estudio Geotécnico Sísmico de la Estabilidad del Talud del Acantilado de la Costa Verde, considerando la amenaza por Tsunami y el Comportamiento estructural de las Edificaciones ubicadas sobre el Acantilado (Convenio UNI-FONDES, 2021)

Tabla N°20. Ubicación de ensayo SPT recopilados

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Coordenadas UTM		Profundidad (m)	Nivel freático
				Este (m)	Norte (m)		
SPT-01_LP ⁽¹⁾	E 02	La Perla	1970	269219	8664505	5	N.E.
SPT-02_LP ⁽¹⁾	SPT-01	La Perla	1999	267885	8665025	7.15	N.E.
SPT-03_LP ⁽¹⁾	SPT-02	La Perla	1999	267875	8665010	6.65	N.E.
SPT-04_LP ⁽¹⁾	SPT-03	La Perla	1999	267846	8665020	7.5	N.E.
SPT-05_LP ⁽¹⁾	SPT - 01	La Perla	2016	269833	8664084	5.45	N.E.
SPT-06_LP ⁽¹⁾	SPT - 02	La Perla	2016	268468	8664857	5.45	N.E.
SPT-07_LP ⁽¹⁾	SPT - 03	La Perla	2016	269383	8664590	7.45	N.E.
SPT-08_LP ⁽¹⁾	SPT - 04	La Perla	2016	270314	8664996	4.45	N.E.

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)

Tabla N°21. Clasificación SUCS

Código	Distrito	Profundidad (m)	Clasificación SUCS	Humedad (%)
C-18 LP ⁽¹⁾	La Perla	0.20 – 2.40	CL	3.9
	La Perla	2.40 – 3.10	CL	10
C-19 LP ⁽¹⁾	La Perla	1.40 – 2.10	CL	14.6
	La Perla	2.10 – 3.00	CL	25.3
C-20 LP ⁽¹⁾	La Perla	0.20 – 1.30	CL	11.9
	La Perla	1.30 – 2.20	CL	11.2
	La Perla	2.20 – 2.40	CL	21.8
	La Perla	2.40 – 3.20	ML	9.2
C-21 LP ⁽¹⁾	La Perla	1.80 – 2.20	SM	2.3
	La Perla	2.20 – 2.60	CL	26.8

Código	Distrito	Profundidad (m)	Clasificación SUCS	Humedad (%)
C-22 LP ⁽¹⁾	La Perla	2.60 – 3.00	SM	7.2
	La Perla	0.30 – 1.10	CL	12.6
	La Perla	1.10 – 1.90	CL	18.9
	La Perla	1.90 – 3.00	CL	13.7
	La Perla	3.00 – 3.20	SP-SM	2.1
C-23 LP ⁽¹⁾	La Perla	0.30 – 0.70	CL-ML	5.1
	La Perla	0.70 – 1.70	CH	22.2
	La Perla	1.70 – 3.00	SM	6.9
C-24 LP ⁽¹⁾	La Perla	0.30 – 2.70	ML	5.4
	La Perla	2.70 – 3.10	CL	28.9
C-25 LP ⁽¹⁾	La Perla	0.30 – 1.30	CL	17.8
	La Perla	1.30 – 2.10	CL	7.3
	La Perla	2.10 – 2.90	CH	29.8
	La Perla	2.90 – 3.20	SM	6.7
C-26 LP ⁽¹⁾	La Perla	0.50 – 1.50	CL	13.8
	La Perla	1.50 – 1.80	CH	28.2
	La Perla	1.80 – 2.10	ML	13.7
	La Perla	2.10 – 3.10	CL	21.8
C-27 LP ⁽¹⁾	La Perla	0.40 – 2.80	CL	15.1
	La Perla	2.80 – 3.00	SM	8.1
SPT-05 LP ⁽¹⁾	La Perla	1.00 – 1.45	SM	6.3
	La Perla	2.00 – 2.45	CL	27.1
	La Perla	2.45 – 3.00	CL	24.7
	La Perla	3.00 – 3.45	SM	7.8
	La Perla	4.00 – 4.45	SM	4.3
	La Perla	5.00 – 5.45	CL	24.9
	La Perla	5.45 – 6.00	CL-ML	15
	La Perla	6.00 – 6.45	CL	25.5
	La Perla	7.00 – 7.45	CL	22
	La Perla	8.00 – 8.45	SM	21.2
	La Perla	9.00 – 9.45	CL	33.4
	La Perla	10.00 – 10.45	CL	23
	La Perla	11.45 – 11.60	CL	19.5
	La Perla	11.60 – 11.80	SC-SM	12.6
SPT-06 LP ⁽¹⁾	La Perla	1.00 – 1.45	CL	15.5
	La Perla	2.00 – 2.45	CL	15.5
	La Perla	3.00 – 3.45	SC-SM	8.9
	La Perla	3.45 – 4.00	GP-GM	2.2
SPT-07 LP ⁽¹⁾	La Perla	1.00 – 1.45	CL	7.9
	La Perla	2.00 – 2.45	CL	18.2
	La Perla	3.00 – 3.45	SM	3
	La Perla	4.00 – 4.45	SM	4.3
	La Perla	5.00 – 5.45	CL	17.9
	La Perla	6.00 – 6.45	CL	15.7
	La Perla	7.00 – 7.45	ML	7.5
SPT-08 LP ⁽¹⁾	La Perla	0.00 – 1.00	CL	15.2
	La Perla	1.00 – 1.45	CL	18.9
	La Perla	2.00 – 2.45	CL	17.7
	La Perla	3.00 – 3.45	CL-ML	10.5
	La Perla	4.00 – 4.45	CL	14
C-59 SM ⁽²⁾	San Miguel	0.30 - 0.70	ML	6.5
	San Miguel	0.70 - 3.00	CL	14.7
C-60 SM ⁽²⁾	San Miguel	0.90 - 3.00	CL-ML	9
C-61 SM ⁽²⁾	San Miguel	0.30 - 1.50	CL-ML	4.5
	San Miguel	1.50 - 3.00	SC-SM	7.9

Código	Distrito	Profundidad (m)	Clasificación SUCS	Humedad (%)
C-62 SM ⁽²⁾	San Miguel	0.20 - 1.60	CL	14
	San Miguel	1.60 - 2.30	CL-ML	8.6
	San Miguel	2.30 - 3.00	SM	4.2
C-63 SM ⁽²⁾	San Miguel	0.20 - 1.30	CL	8.4
	San Miguel	1.30 - 3.00	SM	6.7
C-64 SM ⁽²⁾	San Miguel	1.00 - 2.40	CL	14
	San Miguel	2.40 - 3.00	SM	4.1
C-65 SM ⁽²⁾	San Miguel	0.00 - 1.20	CL-ML	11.5
	San Miguel	1.20 - 3.00	GW-GM	1.2
C-66 SM ⁽²⁾	San Miguel	0.00 - 1.70	ML	3.8
	San Miguel	1.70 - 3.00	GP-GM	0.8
C-67 SM ⁽²⁾	San Miguel	0.30 - 0.60	CL	7.6
	San Miguel	0.60 - 3.00	GP	0.8
C-68 SM ⁽²⁾	San Miguel	0.40 - 1.00	CL	6.6
	San Miguel	1.00 - 3.00	GP	1.3
C-69 SM ⁽²⁾	San Miguel	0.40 - 2.10	CL-ML	18.1
	San Miguel	2.10 - 3.00	GP	1.1
C-70 SM ⁽²⁾	San Miguel	1.20 - 2.20	GC	13.1
	San Miguel	2.20 - 3.00	GP-GM	2.3
C-71 SM ⁽²⁾	San Miguel	1.20 - 3.00	CL	18.3
	San Miguel	0.15 - 1.90	CL-ML	10
C-73 SM ⁽²⁾	San Miguel	1.90 - 2.25	ML	12.9
	San Miguel	2.25 - 3.00	GP-GM	1.2
C-74 SM ⁽²⁾	San Miguel	2.40 - 3.50	GC-GM	6
C-75 SM ⁽³⁾	San Miguel	2.40 - 3.50	GC-GM	6

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)
- (2) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ZONAS UBICADAS EN LOS DISTRITOS DE: SAN JUAN DE MIRAFLORES, SANTA ROSA, SAN MIGUEL (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), CARMEN DE LA LEGUA REYNOSO (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO). (CISMID, 2015)
- (3) Estudio Geotécnico Sísmico de la Estabilidad del Talud del Acantilado de la Costa Verde, considerando la amenaza por Tsunami y el Comportamiento estructural de las Edificaciones ubicadas sobre el Acantilado (Convenio UNI-FONDES, 2021)

Tabla N°22. Ubicación de pozos

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Coordenadas UTM		Profundidad (m)	Nivel freático (m)
				Este (m)	Norte (m)		
PZ-01_LP ⁽¹⁾	S01	La Perla	-	269220	8665246	50	N.E.
PZ-02_LP ⁽¹⁾	001 - R	La Perla	-	268992	8664682	50	N.E.
PZ-01_SM ⁽²⁾	PR-01	San Miguel	-	272370	8664109	110	N.E.
PZ-02_SM ⁽²⁾	PR-02	San Miguel	-	273467	8665601	110	56.41
PZ-03_SM ⁽²⁾	PR-03	San Miguel	-	273591	8662913	146.6	48.76

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)
- (2) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ZONAS UBICADAS EN LOS DISTRITOS DE: SAN JUAN DE MIRAFLORES, SANTA ROSA, SAN MIGUEL (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), CARMEN DE LA LEGUA REYNOSO (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO). (CISMID, 2015)

Tabla N°23. Densidad del suelo

Código	Distrito	Clasificación SUCS	Profundidad (m)	Método	Humedad (%)	Densidad húmeda (g/cm³)
C-18 LP ⁽¹⁾	La Perla	CL	0.20 - 1.40	Peso volumétrico	3.9	1.97
C-19 LP ⁽¹⁾	La Perla	CL	1.5	Cono de arena	14.6	1.76
C-20 LP ⁽¹⁾	La Perla	CL	1.5	Cono de arena	11.2	1.65
C-24 LP ⁽¹⁾	La Perla	ML	1.5	Cono de arena	5.4	1.68
C-59 SM ⁽²⁾	San Miguel	CL	0.70 - 3.00	Peso volumétrico	15.5	1.69
C-73 SM ⁽²⁾	San Miguel	ML	1.90 - 2.25	Cono de arena	12.9	1.6
C-73 SM ⁽²⁾	San Miguel	GP – GM	2.25 - 3.00	Reemplazo de arena	1.2	2.06
C-74 SM ⁽²⁾	San Miguel	GC – GM	2.40 - 3.50	Reemplazo de arena	6	2.02

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)
- (2) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ZONAS UBICADAS EN LOS DISTRITOS DE: SAN JUAN DE MIRAFLORES, SANTA ROSA, SAN MIGUEL (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), CARMEN DE LA LEGUA REYNOSO (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO). (CISMID, 2015)

Tabla N°24. Parámetros mecánicos del suelo

Código	Muestra	Clasificación SUCS	Profundidad (m)	Ensayo	Cohesión (Kg/cm ²)	Ángulo de fricción (°)
C-18 LP ⁽¹⁾	La Perla	CL	0.20 – 1.40	Corte directo	0.3	28
C-19 LP ⁽¹⁾	La Perla	CL	1.40 – 2.10	Corte directo	0.25	21.5
C-20 LP ⁽¹⁾	La Perla	CL	1.30 – 2.20	Corte directo	0.1	23.5
C-23 LP ⁽¹⁾	La Perla	CH	0.70 – 1.70	Compresión triaxial	1	17.7
C-24 LP ⁽¹⁾	La Perla	ML	0.30 – 2.70	Corte directo	0	27.5
C-59 SM ⁽²⁾	San Miguel	CL	0.70 - 3.00	Corte directo	0	27
C-63 SM ⁽²⁾	San Miguel	SM	1.30 - 3.00	Corte directo	0.5	29
C-66 SM ⁽²⁾	San Miguel	GP	1.70 - 3.00	Compresión triaxial UU	0.65	40
C-67 SM ⁽²⁾	San Miguel	GP -GC	0.60 - 3.00	Compresión triaxial UU	0.65	40
C-73 SM ⁽²⁾	San Miguel	ML	1.90 - 2.25	Corte directo	0	27
C-73 SM ⁽²⁾	San Miguel	GP – GM	2.25 - 3.00	Corte directo a gran escala	0.45	42
C-74 SM ⁽²⁾	San Miguel	GC – GM	2.40 - 3.50	Corte directo a gran escala	0.4	41

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)
- (2) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ZONAS UBICADAS EN LOS DISTRITOS DE: SAN JUAN DE MIRAFLORES, SANTA ROSA, SAN MIGUEL (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), CARMEN DE LA LEGUA REYNOSO (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO). (CISMID, 2015)

Tabla N°25. Ubicación y periodos de mediciones puntuales de microtremores

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Coordenadas UTM		Periodo T0 (s)	Periodo T1 (s)
				Este (m)	Norte (m)		
MT-001 LP ⁽¹⁾	M-01	La Perla	2016	267958.53	8664959.76	-	0.20
MT-002 LP ⁽¹⁾	M-02	La Perla	2016	267941.30	8664836.69	-	0.22
MT-003 LP ⁽¹⁾	M-03	La Perla	2016	268231.36	8664733.16	-	0.11
MT-004 LP ⁽¹⁾	M-04	La Perla	2016	268202.50	8664985.01	1.15	0.20
MT-005 LP ⁽¹⁾	M-05	La Perla	2016	268583.80	8664941.27	1.32	0.15
MT-006 LP ⁽¹⁾	M-06	La Perla	2016	268648.24	8664637.25	1.28	0.16
MT-007 LP ⁽¹⁾	M-07	La Perla	2016	268572.18	8665133.94	1.67	0.21
MT-008 LP ⁽¹⁾	M-08	La Perla	2016	268888.65	8665150.12	-	0.19
MT-009 LP ⁽¹⁾	M-09	La Perla	2016	269185.45	8665215.82	-	-
MT-010 LP ⁽¹⁾	M-10	La Perla	2016	268984.55	8664944.27	-	0.10
MT-011 LP ⁽¹⁾	M-11	La Perla	2016	268849.58	8664710.40		0.19
MT-012 LP ⁽¹⁾	M-12	La Perla	2016	269370.34	8665065.54	1.59	0.10
MT-013 LP ⁽¹⁾	M-13	La Perla	2016	269187.90	8664857.98	1.54	0.10
MT-014 LP ⁽¹⁾	M-14	La Perla	2016	269184.49	8664524.44	1.45	0.15
MT-015 LP ⁽¹⁾	M-15	La Perla	2016	269112.03	8664332.01	1.43	0.16

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Coordenadas UTM		Periodo T0 (s)	Periodo T1 (s)
				Este (m)	Norte (m)		
MT-016 LP ⁽¹⁾	M-16	La Perla	2016	269836.14	8664077.90	0.75	0.17
MT-017 LP ⁽¹⁾	M-17	La Perla	2016	269995.44	8664476.16	1.54	-
MT-018 LP ⁽¹⁾	M-18	La Perla	2016	269640.10	8664446.08	1.43	0.17
MT-019 LP ⁽¹⁾	M-19	La Perla	2016	269404.94	8664732.85	1.47	0.10
MT-020 LP ⁽¹⁾	M-20	La Perla	2016	269754.09	8664859.04	1.52	0.08
MT-021 LP ⁽¹⁾	M-21	La Perla	2016	270062.47	8664780.31	1.54	0.06
MT-022 LP ⁽¹⁾	M-22	La Perla	2016	270212.59	8664985.52	1.39	0.10
MT-023 LP ⁽¹⁾	M-23	La Perla	2016	269702.30	8665248.26	1.63	0.07
MT-024 LP ⁽¹⁾	M-24	La Perla	2016	270001.42	8665338.87	1.54	0.17
MT-025 LP ⁽¹⁾	M-25	La Perla	2016	270254.90	8665444.72	1.59	0.10
MT-026 LP ⁽¹⁾	M-26	La Perla	2016	270409.45	8665245.30	-	0.08
MT-027 LP ⁽¹⁾	M-27	La Perla	2016	270709.60	8665400.86	1.35	0.12
MT-028 LP ⁽¹⁾	M-28	La Perla	2016	270917.75	8665084.78	1.52	-
MT-029 LP ⁽¹⁾	M-29	La Perla	2016	270628.27	8664944.12	1.29	0.13
MT-030 LP ⁽¹⁾	M-30	La Perla	2016	270664.28	8664453.98	1.30	0.19
MT-031 LP ⁽¹⁾	M-31	La Perla	2016	270449.36	8664404.08	1.35	-
MT-032 LP ⁽¹⁾	M-32	La Perla	2016	270268.17	8664542.55	1.00	0.08
MT-033 LP ⁽¹⁾	M-33	La Perla	2016	270177.56	8663978.29	1.35	-
MT-034 LP ⁽¹⁾	M-34	La Perla	2016	270266.41	8664234.15	1.22	0.16
MT-035 LP ⁽¹⁾	M-35	La Perla	2016	269362.26	8664435.86	1.15	0.15
MT-036 LP ⁽¹⁾	M-36	La Perla	2016	268005.00	8664788.00	1.36	0.10
MT-037 LP	-	La Perla	2021	269812.00	8665284.00	1.42	0.13
MT-038 LP	-	La Perla	2021	270281.08	8664977.64	1.35	0.12
MT-039 LP	-	La Perla	2021	269082.98	8665113.81	1.46	0.16
MT-040 LP	-	La Perla	2021	269749.37	8664724.28	1.39	0.07
MT-041 LP	-	La Perla	2021	268641.56	8664992.86	1.40	0.14
MT-042 LP	-	La Perla	2021	269099.64	8664707.47	1.40	0.15
MT-043 LP	-	La Perla	2021	269856.51	8664232.53	1.40	0.11
MT-044 LP	-	La Perla	2021	270206.23	8664327.63	1.23	0.11
MT-045 LP	-	La Perla	2021	270018.51	8664280.92	1.29	0.14
MT-046 LP	-	La Perla	2021	270256.16	8664531.95	1.30	0.07
MT-047 LP	-	La Perla	2021	270357.37	8664202.31	1.26	0.14
MT-048 LP ⁽²⁾	M-09	La Perla	2021	269342.73	8664326.82	1.35	0.16
MT-001 SM ⁽³⁾	M-01	San Miguel	2015	271295.00	8663583.00	1.00	0.07
MT-002 SM ⁽³⁾	M-02	San Miguel	2015	271204.46	8663373.62	1.10	0.12
MT-003 SM ⁽³⁾	M-03	San Miguel	2015	270790.33	8663527.67	1.00	0.13
MT-004 SM ⁽³⁾	M-04	San Miguel	2015	270398.67	8663733.02	1.29	0.14
MT-005 SM ⁽³⁾	M-05	San Miguel	2015	270621.04	8663746.90	1.62	-
MT-006 SM ⁽³⁾	M-06	San Miguel	2015	270576.40	8664184.86	1.20	0.13
MT-007 SM ⁽³⁾	M-07	San Miguel	2015	270903.00	8664474.00	1.40	0.11
MT-008 SM ⁽³⁾	M-08	San Miguel	2015	271122.28	8665496.54	1.45	0.13
MT-009 SM ⁽³⁾	M-09	San Miguel	2015	271628.96	8665760.24	1.14	0.06
MT-010 SM ⁽³⁾	M-10	San Miguel	2015	271477.41	8665327.53	1.18	0.10
MT-011 SM ⁽³⁾	M-11	San Miguel	2015	271513.43	8665046.97	1.36	0.07
MT-012 SM ⁽³⁾	M-12	San Miguel	2015	271483.38	8664435.49	1.05	0.10
MT-013 SM ⁽³⁾	M-13	San Miguel	2015	271268.27	8664608.34	1.25	0.08
MT-014 SM ⁽³⁾	M-14	San Miguel	2015	271443.10	8664816.93	1.18	-
MT-015 SM ⁽³⁾	M-15	San Miguel	2015	271025.94	8665348.85	1.40	0.11
MT-016 SM ⁽³⁾	M-16	San Miguel	2015	271215.77	8665149.14	1.25	0.10
MT-017 SM ⁽³⁾	M-17	San Miguel	2015	271041.18	8664129.57	1.18	0.16
MT-018 SM ⁽³⁾	M-18	San Miguel	2015	271507.11	8664024.48	1.05	0.08
MT-019 SM ⁽³⁾	M-19	San Miguel	2015	271110.09	8663637.35	1.11	0.15
MT-020 SM ⁽³⁾	M-20	San Miguel	2015	271868.00	8663087.03	1.02	0.11
MT-021 SM ⁽³⁾	M-21	San Miguel	2015	272536.33	8662784.86	0.97	0.16
MT-022 SM ⁽³⁾	M-22	San Miguel	2015	273413.07	8662624.46	0.74	0.07
MT-023 SM ⁽³⁾	M-23	San Miguel	2015	273594.34	8662358.28	0.85	0.11
MT-024 SM ⁽³⁾	M-24	San Miguel	2015	273871.73	8663371.53	0.94	-
MT-025 SM ⁽³⁾	M-25	San Miguel	2015	272727.52	8663388.71	-	0.06
MT-026 SM ⁽³⁾	M-26	San Miguel	2015	273058.02	8662931.36	-	0.06

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Coordenadas UTM		Periodo T0 (s)	Periodo T1 (s)
				Este (m)	Norte (m)		
MT-027 SM ⁽³⁾	M-27	San Miguel	2015	273732.67	8662826.18	0.85	-
MT-028 SM ⁽³⁾	M-28	San Miguel	2015	273536.21	8663572.80	1.00	-
MT-029 SM ⁽³⁾	M-29	San Miguel	2015	273043.13	8664085.46	0.88	-
MT-030 SM ⁽³⁾	M-30	San Miguel	2015	272415.03	8664564.56	0.89	0.06
MT-031 SM ⁽³⁾	M-31	San Miguel	2015	271872.35	8664496.23	-	0.07
MT-032 SM ⁽³⁾	M-32	San Miguel	2015	272056.73	8664225.10	1.00	0.06
MT-033 SM ⁽³⁾	M-33	San Miguel	2015	271872.17	8665487.68	1.00	0.06
MT-034 SM ⁽³⁾	M-34	San Miguel	2015	271888.29	8664989.31	1.00	-
MT-035 SM ⁽³⁾	M-35	San Miguel	2015	271838.03	8663871.88	1.00	0.08
MT-036 SM ⁽³⁾	M-36	San Miguel	2015	271734.44	8663590.69	0.95	0.07
MT-037 SM ⁽³⁾	M-37	San Miguel	2015	272161.81	8663755.52	0.85	0.06
MT-038 SM ⁽³⁾	M-38	San Miguel	2015	272970.58	8665418.16	0.75	0.09
MT-039 SM ⁽³⁾	M-39	San Miguel	2015	273683.69	8665460.98	1.50	0.05
MT-040 SM ⁽³⁾	M-40	San Miguel	2015	271488.00	8663204.00	-	0.30
MT-041 SM ⁽³⁾	A-01	San Miguel	2015	270679.24	8663539.05	0.77	0.13
MT-042 SM ⁽³⁾	A-02	San Miguel	2015	273650.00	8662225.00	0.80	0.09
MT-043 SM ⁽⁴⁾	PUCP	San Miguel	2014	273631.97	8664470.03	0.77	0.15
MT-044 SM ⁽⁵⁾	LEY01	San Miguel	2018	272959.00	8664965.00	0.85	-
MT-045 SM ⁽⁶⁾	SM01-02	San Miguel	2021	270243.69	8663955.84	0.93	-
MT-046 SM ⁽⁶⁾	SM01-03	San Miguel	2021	270221.36	8663888.87	0.99	-
MT-047 SM ⁽⁶⁾	SM01-04	San Miguel	2021	270186.96	8663829.87	1.25	0.28
MT-048 SM ⁽⁶⁾	SM01-05	San Miguel	2021	270168.94	8663771.40	1.18	0.16
MT-049 SM ⁽⁶⁾	SM02-02	San Miguel	2021	270553.62	8663857.00	1.01	-
MT-050 SM ⁽⁶⁾	SM02-03	San Miguel	2021	270529.11	8663814.25	1.00	-
MT-051 SM ⁽⁶⁾	SM02-04	San Miguel	2021	270495.10	8663762.32	1.22	-
MT-052 SM ⁽⁶⁾	SM02-05	San Miguel	2021	270458.01	8663700.37	1.03	0.35
MT-053 SM ⁽⁶⁾	SM02-06	San Miguel	2021	270403.04	8663618.91	0.94	0.27
MT-054 SM ⁽⁶⁾	SM03-02	San Miguel	2021	270845.38	8663712.32	1.03	-
MT-055 SM ⁽⁶⁾	SM03-03	San Miguel	2021	270805.22	8663651.41	1.02	-
MT-056 SM ⁽⁶⁾	SM03-04	San Miguel	2021	270773.04	8663612.07	0.88	-
MT-057 SM ⁽⁶⁾	SM03-05	San Miguel	2021	270754.46	8663573.84	0.82	-
MT-058 SM ⁽⁶⁾	SM03-06	San Miguel	2021	270725.18	8663519.05	1.12	0.23
MT-059 SM ⁽⁶⁾	SM03-07	San Miguel	2021	270675.54	8663445.84	-	0.21
MT-060 SM ⁽⁶⁾	SM04-02	San Miguel	2021	271029.82	8663603.21	0.88	-
MT-061 SM ⁽⁶⁾	SM04-03	San Miguel	2021	271017.43	8663543.82	0.86	-
MT-062 SM ⁽⁶⁾	SM04-04	San Miguel	2021	270998.57	8663497.22	0.82	-
MT-063 SM ⁽⁶⁾	SM04-05	San Miguel	2021	270960.01	8663451.07	0.95	-
MT-064 SM ⁽⁶⁾	SM04-06	San Miguel	2021	270887.60	8663302.03	0.92	-
MT-065 SM ⁽⁶⁾	SM05-02	San Miguel	2021	271300.25	8663480.81	1.04	-
MT-066 SM ⁽⁶⁾	SM05-03	San Miguel	2021	271269.44	8663427.16	1.03	-
MT-067 SM ⁽⁶⁾	SM05-04	San Miguel	2021	271250.73	8663372.41	1.06	-
MT-068 SM ⁽⁶⁾	SM05-05	San Miguel	2021	271209.59	8663300.21	0.95	-
MT-069 SM ⁽⁶⁾	SM05-06	San Miguel	2021	271177.12	8663169.01	0.91	-
MT-070 SM ⁽⁶⁾	SM06-02	San Miguel	2021	271590.70	8663372.65	0.94	-
MT-071 SM ⁽⁶⁾	SM06-03	San Miguel	2021	271572.88	8663331.26	0.76	0.11
MT-072 SM ⁽⁶⁾	SM06-04	San Miguel	2021	271543.08	8663277.24	0.76	0.13
MT-073 SM ⁽⁶⁾	SM06-05	San Miguel	2021	271515.40	8663226.26	0.94	0.30
MT-074 SM ⁽⁶⁾	SM06-06	San Miguel	2021	271480.86	8663143.58	0.84	0.23
MT-075 SM ⁽⁶⁾	SM07-01	San Miguel	2021	271876.26	8663401.58	0.73	-
MT-076 SM ⁽⁶⁾	SM07-05	San Miguel	2021	271716.92	8663120.60	0.81	0.35
MT-077 SM ⁽⁶⁾	SM07-06	San Miguel	2021	271689.16	8663048.09	0.70	0.20
MT-078 SM ⁽⁶⁾	SM07-07	San Miguel	2021	271646.34	8662960.43	0.94	0.19
MT-079 SM ⁽⁶⁾	SM08-01	San Miguel	2021	272066.00	8663311.82	0.81	-
MT-080 SM ⁽⁶⁾	SM08-02	San Miguel	2021	271978.19	8663180.64	0.83	-
MT-081 SM ⁽⁶⁾	SM08-03	San Miguel	2021	271972.28	8663149.56	1.01	
MT-082 SM ⁽⁶⁾	SM08-04	San Miguel	2021	271902.98	8663047.40	0.75	0.31
MT-083 SM ⁽⁶⁾	SM08-05	San Miguel	2021	271894.45	8662966.88	0.81	-
MT-084 SM ⁽⁶⁾	SM09-01	San Miguel	2021	272253.76	8663217.78	0.89	-
MT-085 SM ⁽⁶⁾	SM09-03	San Miguel	2021	272163.79	8663027.85	0.81	-

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Coordenadas UTM		Periodo T0 (s)	Periodo T1 (s)
				Este (m)	Norte (m)		
MT-086 SM ⁽⁶⁾	SM09-04	San Miguel	2021	272135.76	8662966.27	-	0.27
MT-087 SM ⁽⁶⁾	SM09-05	San Miguel	2021	272112.62	8662919.60	0.79	0.34
MT-088 SM ⁽⁶⁾	SM09-06	San Miguel	2021	272044.30	8662780.30	0.72	0.22
MT-089 SM ⁽⁶⁾	SM09-07	San Miguel	2021	272025.86	8662741.12	0.83	0.19
MT-090 SM ⁽⁶⁾	SM10-02	San Miguel	2021	272371.36	8663017.88	0.83	-
MT-091 SM ⁽⁶⁾	SM10-04	San Miguel	2021	272296.35	8662866.71	0.83	0.32
MT-092 SM ⁽⁶⁾	SM10-05	San Miguel	2021	272256.35	8662773.62	0.84	0.30
MT-093 SM ⁽⁶⁾	SM10-06	San Miguel	2021	272239.42	8662691.78	0.84	0.24
MT-094 SM ⁽⁶⁾	SM11-01	San Miguel	2021	272604.86	8663054.44	0.91	-
MT-095 SM ⁽⁶⁾	SM11-02	San Miguel	2021	272551.26	8662938.06	0.71	-
MT-096 SM ⁽⁶⁾	SM11-03	San Miguel	2021	272527.20	8662880.49	0.81	-
MT-097 SM ⁽⁶⁾	SM11-04	San Miguel	2021	272493.17	8662805.60	0.77	0.14
MT-098 SM ⁽⁶⁾	SM11-05	San Miguel	2021	272478.59	8662771.26	0.76	0.29
MT-099 SM ⁽⁶⁾	SM11-06	San Miguel	2021	272457.82	8662723.75	0.74	0.25
MT-100 SM ⁽⁶⁾	SM11-07	San Miguel	2021	272428.08	8662631.84	0.79	0.24
MT-101 SM ⁽⁶⁾	SM11-08	San Miguel	2021	272386.12	8662550.17	0.80	0.24
MT-102 SM ⁽⁶⁾	SM12-02	San Miguel	2021	272831.69	8662737.62	0.84	-
MT-103 SM ⁽⁶⁾	SM12-03	San Miguel	2021	272770.81	8662661.15	0.68	0.11
MT-104 SM ⁽⁶⁾	SM12-04	San Miguel	2021	272783.26	8662636.89	0.65	0.28
MT-105 SM ⁽⁶⁾	SM12-05	San Miguel	2021	272775.00	8662622.00	0.81	0.28
MT-106 SM ⁽⁶⁾	SM12-06	San Miguel	2021	272736.21	8662544.22	0.83	0.22
MT-107 SM ⁽⁶⁾	SM13-01	San Miguel	2021	273013.99	8662870.05	0.80	-
MT-108 SM ⁽⁶⁾	SM13-02	San Miguel	2021	272945.67	8662733.45	0.74	-
MT-109 SM ⁽⁶⁾	SM13-03	San Miguel	2021	272911.89	8662656.57	0.76	-
MT-110 SM ⁽⁶⁾	SM13-04	San Miguel	2021	272888.90	8662617.04	0.70	-
MT-111 SM ⁽⁶⁾	SM13-05	San Miguel	2021	272855.29	8662598.38	0.86	0.15
MT-112 SM ⁽⁶⁾	SM13-06	San Miguel	2021	272861.27	8662542.16	0.63	0.28
MT-113 SM ⁽⁶⁾	SM13-07	San Miguel	2021	272827.23	8662479.61	0.84	0.20
MT-114 SM ⁽⁶⁾	SM14-01	San Miguel	2021	273139.92	8662669.41	0.81	-
MT-115 SM ⁽⁶⁾	SM14-02	San Miguel	2021	273101.98	8662600.94	0.84	0.11
MT-116 SM ⁽⁶⁾	SM14-03	San Miguel	2021	273058.00	8662556.47	0.72	-
MT-117 SM ⁽⁶⁾	SM14-04	San Miguel	2021	273110.11	8662543.64	1.10	0.18
MT-118 SM ⁽⁶⁾	SM14-05	San Miguel	2021	272995.07	8662580.52	0.80	-
MT-119 SM ⁽⁶⁾	SM14-06	San Miguel	2021	273015.19	8662551.13	0.65	-
MT-120 SM ⁽⁶⁾	SM15-01	San Miguel	2021	273232.68	8662707.58	0.83	-
MT-121 SM ⁽⁶⁾	SM15-02	San Miguel	2021	273188.03	8662627.40	0.70	-
MT-122 SM ⁽⁶⁾	SM15-03	San Miguel	2021	273166.61	8662583.67	0.71	-
MT-123 SM ⁽⁶⁾	SM15-05	San Miguel	2021	273128.06	8662495.40	0.61	-
MT-124 SM ⁽⁶⁾	SM15-06	San Miguel	2021	273109.83	8662460.20	0.60	-
MT-125 SM ⁽⁶⁾	SM15-07	San Miguel	2021	273081.25	8662395.48	0.83	0.19
MT-126 SM ⁽⁶⁾	SM15-08	San Miguel	2021	273017.02	8662261.87	0.67	0.23
MT-127 SM ⁽⁶⁾	SM16-01	San Miguel	2021	273347.16	8662651.42	0.79	-
MT-128 SM ⁽⁶⁾	SM16-02	San Miguel	2021	273297.22	8662556.81	0.73	-
MT-129 SM ⁽⁶⁾	SM16-03	San Miguel	2021	273246.06	8662460.39	0.68	0.10
MT-130 SM ⁽⁶⁾	SM16-04	San Miguel	2021	273228.49	8662409.63	0.85	0.15
MT-131 SM ⁽⁶⁾	SM16-06	San Miguel	2021	273182.00	8662325.00	0.82	0.19
MT-132 SM ⁽⁶⁾	SM17-02	San Miguel	2021	273499.74	8662518.71	0.76	-
MT-133 SM ⁽⁶⁾	SM17-05	San Miguel	2021	273427.22	8662370.50	0.81	0.11
MT-134 SM ⁽⁶⁾	SM17-06	San Miguel	2021	273393.65	8662331.61	0.81	0.10
MT-135 SM ⁽⁶⁾	SM17-07	San Miguel	2021	273451.67	8662282.49	0.95	0.25
MT-136 SM ⁽⁶⁾	SM17-08	San Miguel	2021	273392.63	8662304.53	0.83	0.14
MT-137 SM ⁽⁶⁾	SM17-09	San Miguel	2021	273347.59	8662202.18	0.76	0.16
MT-138 SM ⁽⁶⁾	SM18-02	San Miguel	2021	273673.35	8662436.11	0.79	-
MT-139 SM ⁽⁶⁾	SM18-03	San Miguel	2021	273644.92	8662375.58	0.84	-
MT-140 SM ⁽⁶⁾	SM18-04	San Miguel	2021	273621.40	8662338.14	0.81	-
MT-141 SM ⁽⁶⁾	SM18-05	San Miguel	2021	273602.09	8662299.10	0.83	0.06
MT-142 SM ⁽⁶⁾	SM18-06	San Miguel	2021	273582.76	8662266.53	0.99	0.06
MT-143 SM ⁽⁶⁾	SM18-07	San Miguel	2021	273541.88	8662199.53	0.73	0.11
MT-144 SM ⁽⁶⁾	SM18-08	San Miguel	2021	273492.62	8662110.43	0.72	0.10

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Coordenadas UTM		Periodo T0 (s)	Periodo T1 (s)
				Este (m)	Norte (m)		
MT-145 SM ⁽⁶⁾	SM18-09	San Miguel	2021	273446.07	8662006.99	0.78	0.15
MT-146 SM ⁽⁶⁾	SM19-01	San Miguel	2021	273685.59	8662257.36	0.57	0.11
MT-147 SM ⁽⁶⁾	SM19-02	San Miguel	2021	273672.90	8662211.74	0.90	0.24
MT-148 SM ⁽⁶⁾	SM19-03	San Miguel	2021	273640.59	8662143.37	0.81	0.12
MT-149 SM ⁽⁶⁾	SM20-02	San Miguel	2021	273848.64	8662343.62	0.81	-
MT-150 SM ⁽⁶⁾	SM20-03	San Miguel	2021	273827.02	8662301.94	0.88	-
MT-151 SM ⁽⁶⁾	SM20-04	San Miguel	2021	273808.66	8662263.28	0.85	-
MT-152 SM ⁽⁶⁾	SM20-05	San Miguel	2021	273783.03	8662205.68	0.92	-
MT-153 SM ⁽⁶⁾	SM20-06	San Miguel	2021	273768.92	8662188.42	-	0.29
MT-154 SM ⁽⁶⁾	SM20-07	San Miguel	2021	273757.41	8662166.26	0.85	0.30
MT-155 SM ⁽⁶⁾	SM20-08	San Miguel	2021	273730.73	8662113.49	0.79	0.10
MT-156 SM ⁽⁶⁾	SM20-09	San Miguel	2021	273704.64	8662059.27	0.76	0.13
MT-157 SM ⁽⁶⁾	SM20-10	San Miguel	2021	273621.70	8661900.97	0.72	0.15
MT-158 SM ⁽⁶⁾	SM21-01	San Miguel	2021	273923.87	8662231.91	0.78	-
MT-159 SM ⁽⁶⁾	SM21-02	San Miguel	2021	273909.49	8662191.63	0.79	-
MT-160 SM ⁽⁶⁾	SM21-03	San Miguel	2021	273850.50	8662150.40	-	-
MT-161 SM ⁽⁶⁾	SM21-04	San Miguel	2021	273888.35	8662127.52	0.98	-
MT-162 SM ⁽⁶⁾	SM21-05	San Miguel	2021	273879.28	8662084.47	0.80	0.26
MT-163 SM ⁽⁶⁾	SM21-06	San Miguel	2021	273850.21	8662012.49	0.75	0.12
MT-164 SM ⁽⁶⁾	SM22-03	San Miguel	2021	272602.89	8662712.45	-	0.28
MT-165 SM	-	San Miguel	2021	273443.78	8665597.90	0.69	0.12
MT-166 SM	-	San Miguel	2021	271812.58	8665236.77	0.94	0.07
MT-167 SM	-	San Miguel	2021	271480.15	8664735.67	0.97	0.08
MT-168 SM	-	San Miguel	2021	272924.51	8664191.74	0.80	-
MT-169 SM	-	San Miguel	2021	270835.00	8664033.66	0.83	0.12
MT-170 SM	-	San Miguel	2021	271686.71	8663818.85	0.84	0.08
MT-171 SM	-	San Miguel	2021	272566.78	8662983.61	1.00	0.08
MT-172 SM	-	San Miguel	2021	273547.31	8663306.28	0.77	-
MT-173 SM	-	San Miguel	2021	271013.47	8664767.92	1.20	0.10
MT-174 SM	-	San Miguel	2021	271914.84	8664550.00	0.97	0.06
MT-175 SM	-	San Miguel	2021	271662.26	8664711.83	1.06	0.08
MT-176 SM	-	San Miguel	2021	272181.26	8664687.92	0.90	-
MT-177 SM	-	San Miguel	2021	271901.13	8664250.47	1.00	0.05
MT-178 SM	-	San Miguel	2021	272916.11	8663220.19	0.76	0.05
MT-179 SM	-	San Miguel	2021	272887.69	8663619.09	0.84	-
MT-180 SM	-	San Miguel	2021	273275.93	8663045.33	0.83	0.07
MT-181 SM	-	San Miguel	2021	272584.81	8662996.02	0.80	0.10
MT-182 SM ⁽²⁾	M-22	San Miguel	2021	271927.00	8663104.00	0.88	0.13

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)
- (2) FUSIÓN DE ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING Y TECNOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA PARA LA MITIGACIÓN DE DESASTRES (CISMID, 2021)
- (3) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ZONAS UBICADAS EN LOS DISTRITOS DE: SAN JUAN DE MIRAFLORES, SANTA ROSA, SAN MIGUEL (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), CARMEN DE LA LEGUA REYNOSO (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO). (CISMID, 2015)
- (4) Evaluation of Local Site Amplification in Lima, Peru using Earthquake Ground Motion Records (Quispe, 2015)

- (5) Los depósitos de grava presentan amplificaciones importantes en periodos largos, ¿una realidad? (Quispe et al, 2018)
- (6) Evaluación Geofísica de los Acantilados de la Costa Verde Distrito de San Miguel (IGP, 2021)

Tabla N°26. Ubicación de ensayo de Refracción Sísmica

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Ubicación	Coordenadas UTM		Longitud total (m)
					Este (m)	Norte (m)	
RS-01 LP ⁽¹⁾	LS-01	La Perla	2016	Inicio	268727.1	8664551	48
				Fin	268713.94	8664506.85	
RS-02 LP ⁽¹⁾	LS-02	La Perla	2016	Inicio	268458.9	8664785.05	48
				Fin	268453.04	8664740.85	
RS-03 LP ⁽¹⁾	LS-03	La Perla	2016	Inicio	269241.13	8665240.71	48
				Fin	269227.97	8665280.88	
RS-04 LP ⁽¹⁾	LS-04	La Perla	2016	Inicio	269373.72	8664403.74	48
				Fin	269367.27	8664448.73	
RS-05 LP ⁽¹⁾	LS-05	La Perla	2016	Inicio	269374.77	8664450.89	48
				Fin	269370.31	8664408.7	
RS-06 LP ⁽¹⁾	LS-06	La Perla	2016	Inicio	270355.25	8664985.95	48
				Fin	270348.19	8664941.63	
RS-07 LP ⁽¹⁾	LS-07	La Perla	2016	Inicio	270702.61	8665119.86	48
				Fin	270667.17	8665097.9	
RS-08 LP	-	La Perla	2021	Inicio	270441.34	8664401.01	48
				Fin	270464.25	8664440.9	
RS-09 LP ⁽²⁾	LS-09	La Perla	2021	Inicio	269358	8664336	48
				Fin	269313	8664354	
RS-01 SM ⁽³⁾	LS-01	San Miguel	2015	Inicio	270757.05	8663550.32	72
				Fin	270817.2	8663516.81	
RS-02 SM ⁽³⁾	LS-02	San Miguel	2015	Inicio	271167.31	8663815.61	72
				Fin	271107.86	8663842.16	
RS-03 SM ⁽³⁾	LS-03	San Miguel	2015	Inicio	270862.4	8664295.17	72
				Fin	270917.38	8664268.48	
RS-04 SM ⁽³⁾	LS-04	San Miguel	2015	Inicio	271197.9	8665250.14	72
				Fin	271260.43	8665247.3	
RS-05 SM ⁽³⁾	LS-05	San Miguel	2015	Inicio	271858.99	8664961.2	72
				Fin	271930.82	8664953.45	
RS-06 SM ⁽³⁾	LS-06	San Miguel	2015	Inicio	271549.6	8663766.76	72
				Fin	271612.16	8663731.72	
RS-07 SM ⁽³⁾	LS-07	San Miguel	2015	Inicio	273924.07	8662214.84	72
				Fin	273898.46	8662146.48	
RS-08 SM ⁽³⁾	LS-08	San Miguel	2015	Inicio	273763.65	8662763.27	72
				Fin	273708.11	8662791.69	
RS-09 SM ⁽³⁾	LS-09	San Miguel	2015	Inicio	272909.6	8663388.33	72
				Fin	272879.79	8663326.58	
RS-10 SM ⁽³⁾	LS-10	San Miguel	2015	Inicio	273580.78	8663826.86	72
				Fin	273624.27	8663763.79	
RS-11 SM ⁽³⁾	LS-11	San Miguel	2015	Inicio	271843.46	8664485.94	72
				Fin	271853.5	8664554.07	
RS-12 SM ⁽³⁾	LS-12	San Miguel	2015	Inicio	271601.33	8664419.35	48
				Fin	271629.18	8664381.06	
RS-13 SM ⁽³⁾	LS-13	San Miguel	2015	Inicio	272917.04	8664340.88	72
				Fin	272956.9	8664332.98	
RS-14 SM ⁽³⁾	LS-14	San Miguel	2015	Inicio	273685.24	8665457.89	72
				Fin	273613.71	8665441.53	
RS-15 SM ⁽³⁾	LS-15	San Miguel	2015	Inicio	273663.21	8662225.34	48

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Ubicación	Coordenadas UTM		Longitud total (m)
					Este (m)	Norte (m)	
RS-16 SM ⁽³⁾	LS-16	San Miguel	2015	Inicio	272389	8662809	48
				Fin	273622.08	8662235.7	
RS-17 SM ⁽³⁾	LS-17	San Miguel	2015	Inicio	272259	8662869	48
				Fin	272193	8662892	
RS-18 SM ⁽⁴⁾	RS01-SM	San Miguel	2021	Inicio	270719	8663409	335
				Fin	270891	8663802	
RS-19 SM ⁽⁴⁾	RS02-SM	San Miguel	2021	Inicio	272470	8662763	335
				Fin	272622	8663073	
RS-20 SM ⁽⁴⁾	RS03-SM	San Miguel	2021	Inicio	273580	8662261	335
				Fin	273736	8662573	
RS-21 SM ⁽⁴⁾	RS04-SM	San Miguel	2021	Inicio	270668	8663563	92
				Fin	270748	8663517	
RS-22 SM ⁽⁴⁾	RS05-SM	San Miguel	2021	Inicio	271441	8663202	92
				Fin	271527	8663169	
RS-23 SM ⁽⁴⁾	RS06-SM	San Miguel	2021	Inicio	272901	8662596	92
				Fin	272981	8662548	
RS-24 SM ⁽⁴⁾	RS07-SM	San Miguel	2021	Inicio	273608	8662243	115
				Fin	273709	8662183	
RS-25 SM ⁽⁴⁾	RS08-SM	San Miguel	2021	Inicio	270083	8664020	115
				Fin	270189	8663975	
RS-26 SM ⁽⁴⁾	RS09-SM	San Miguel	2021	Inicio	270218	8663894	115
				Fin	270261	8663999	
RS-27 SM ⁽⁴⁾	RS10-SM	San Miguel	2021	Inicio	270470	8663714	92
				Fin	270516	8663800	
RS-28 SM ⁽⁴⁾	RS11-SM	San Miguel	2021	Inicio	270925	8663537	69
				Fin	270893	8663476	
RS-29 SM ⁽⁴⁾	RS12-SM	San Miguel	2021	Inicio	271196	8663381	92
				Fin	271281	8663340	
RS-30 SM ⁽⁴⁾	RS13-SM	San Miguel	2021	Inicio	271341	8663320	92
				Fin	271427	8663286	
RS-31 SM ⁽⁴⁾	RS14-SM	San Miguel	2021	Inicio	271869	8663239	69
				Fin	271941	8663206	
RS-32 SM ⁽⁴⁾	RS15-SM	San Miguel	2021	Inicio	271801	8663174	138
				Fin	271921	8663114	
RS-33 SM ⁽⁴⁾	RS16-SM	San Miguel	2021	Inicio	272136	8662968	115
				Fin	272180	8663076	
RS-34 SM ⁽⁴⁾	RS17-SM	San Miguel	2021	Inicio	272089	8662984	92
				Fin	272173	8662964	
RS-35 SM ⁽⁴⁾	RS18-SM	San Miguel	2021	Inicio	272507	8662836	92
				Fin	272538	8662924	
RS-36 SM ⁽⁴⁾	RS19-SM	San Miguel	2021	Inicio	272460	8662818	92
				Fin	272543	8662780	
RS-37 SM ⁽⁴⁾	RS20-SM	San Miguel	2021	Inicio	272771	8662665	92
				Fin	272857	8662641	
RS-38 SM ⁽⁴⁾	RS21-SM	San Miguel	2021	Inicio	273134	8662646	66
				Fin	273194	8662612	
RS-39 SM ⁽⁴⁾	RS22-SM	San Miguel	2021	Inicio	273075	8662564	69
				Fin	273139	8662532	
RS-40 SM ⁽⁴⁾	RS23-SM	San Miguel	2021	Inicio	273244	8662435	69
				Fin	273290	8662384	
RS-41 SM ⁽⁵⁾	LS-05	San Miguel	2021	Inicio	272789.9	8662617.96	48
				Fin	272834.23	8662605.67	
RS-42 SM	-	San Miguel	2021	Inicio	271986.18	8663529.54	48
RS-43 SM	-	San Miguel	2021	Fin	271967.53	8663487.49	48
RS-44 SM	-	San Miguel	2021	Inicio	272473.84	8663787.66	48
				Fin	272472.83	8663741.67	
				Inicio	271910.58	8665443.7	
				Fin	271887.95	8665403.65	48

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Ubicación	Coordenadas UTM		Longitud total (m)
					Este (m)	Norte (m)	
RS-45 SM ⁽²⁾	LS-27	San Miguel	2021	Inicio	271907	8663096	48
				Fin	271930	8663138	

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)
- (2) FUSIÓN DE ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING Y TECNOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA PARA LA MITIGACIÓN DE DESASTRES (CISMID, 2021)
- (3) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ZONAS UBICADAS EN LOS DISTRITOS DE: SAN JUAN DE MIRAFLORES, SANTA ROSA, SAN MIGUEL (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), CARMEN DE LA LEGUA REYNOSO (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO). (CISMID, 2015)
- (4) Evaluación Geofísica de los Acantilados de la Costa Verde Distrito de San Miguel (IGP, 2021)
- (5) Estudio Geotécnico Sísmico de la Estabilidad del Talud del Acantilado de la Costa Verde, considerando la amenaza por Tsunami y el Comportamiento estructural de las Edificaciones ubicadas sobre el Acantilado (Convenio UNI-FONDES, 2021)

Tabla N°27. Perfiles Vp de ensayo de Refracción Sísmica

Código	Estrato sísmico	Vp (m/s)	Profundidad (m)	Descripción
RS-01 LP ⁽¹⁾	1	300-400	0.0-3.3	Material fino de consistencia blanda
	2	400-600	3.3-8.9	Material fino de consistencia media
	3	>600	8.9-16.0	Material probablemente saturado
RS-02 LP ⁽¹⁾	1	300-400	0.0-3.4	Material fino de consistencia blanda
	2	>400	3.4-16.0	Material granular probablemente saturado
RS-03 LP ⁽¹⁾	1	300-400	0.0-2.0	Material fino de consistencia blanda
	2	400-600	2.0-7.5	Material fino de consistencia media
	3	>600	7.5-16.0	Material granular denso
RS-04 LP ⁽¹⁾	1	300-400	0.0-3.7	Material fino de consistencia blanda
	2	400-800	3.7-7.8	Material fino de consistencia media
	3	>800	7.8-16.0	Material granular denso
RS-05 LP ⁽¹⁾	1	200-300	0.0-0.6	Material fino de consistencia blanda
	2	300-700	4.6-11.3	Material fino de consistencia media
	3	>700	11.3-16.0	Material granular denso
RS-06 LP ⁽¹⁾	1	200-400	0.0-2.9	Material fino de consistencia blanda

Código	Estrato sísmico	Vp (m/s)	Profundidad (m)	Descripción
	2	400-900	2.9-6.0	Material fino de consistencia media
	3	>900	6.0-16.0	Material granular denso
RS-07 LP ⁽¹⁾	1	200-400	0.0-2.2	Material fino de consistencia blanda
	2	400-900	2.2-5.7	Material granular medianamente denso
	3	>900	5.7-16.0	Material granular denso
RS-08 LP	1	400-700	0.0-8.7	Material fino de consistencia media
	2	>700	8.7-16.5	Material granular denso
RS-09 LP ⁽²⁾		300-700	0-7.9	Material fino de consistencia media
		>700	7.9-17	Material granular denso
RS-01 SM ⁽³⁾	1	300 – 400	0.0 – 2.2	Material blando
	2	400 – 700	2.2 – 11.4	Material granular medianamente denso
	3	700 - 1300	11.4 – 25.0	Material granular denso
RS-02 SM ⁽³⁾	1	200 – 400	0.0 – 2.7	Material blando
	2	400 – 700	2.7 – 9.0	Material granular medianamente denso
	3	700 – 1300	9.0 – 25.0	Material granular denso
RS-03 SM ⁽³⁾	1	300 – 400	0.0 – 2.5	Material blando
	2	400 – 700	2.5 – 9.3	Material granular medianamente denso
	3	700 – 1300	9.3 – 25.0	Material granular denso
RS-04 SM ⁽³⁾	1	300 – 400	0.0 – 1.2	Material blando
	2	400 – 700	1.2 – 4.1	Material granular medianamente denso
	3	700 – 1400	4.1 – 25.0	Material granular denso
RS-05 SM ⁽³⁾	1	500 – 700	0.0 – 1.8	Material granular medianamente denso
	2	700 – 1500	1.8 – 8.8	Material granular denso
	3	1500 – 1600	8.8 – 25.0	Material granular muy denso
RS-06 SM ⁽³⁾	1	400 – 700	0 – 4.4	Material granular medianamente denso
	2	700 – 1300	4.4 – 25.0	Material granular denso
RS-07 SM ⁽³⁾	1	300 – 400	0 – 1.2	Material blando
	2	400 – 700	1.2 – 2.5	Material granular medianamente denso
	3	700 – 1200	2.5 – 25.0	Material granular denso
RS-08 SM ⁽³⁾	1	200 – 400	0 – 1.1	Material blando
	2	400 – 700	1.1 – 2.0	Material granular medianamente denso

Código	Estrato sísmico	V _p (m/s)	Profundidad (m)	Descripción
RS-09 SM ⁽³⁾	3	700 – 1500	2.0 – 7.3	Material granular denso
	4	1500 – 1600	7.3 – 25.0	Material granular muy denso
RS-10 SM ⁽³⁾	1	400 - 700	0 – 2.8	Material granular medianamente denso
	2	700 - 1300	2.8 – 25.0	Material granular denso
RS-11 SM ⁽³⁾	1	400 – 700	0.0 – 2.2	Material granular medianamente denso
	2	700 – 1500	2.2 – 7.8	Material granular denso
	3	1500 – 1600	7.8 – 25.0	Material granular muy denso
RS-12 SM ⁽³⁾	1	400 – 700	0.0 – 3.3	Material granular medianamente denso
	2	700 – 1300	3.3 – 25.0	Material granular denso
RS-13 SM ⁽³⁾	1	300 – 400	0.0 – 1.6	Material blando
	2	400 – 700	1.6 – 7.6	Material granular medianamente denso
	3	700 – 1200	7.6 – 25.0	Material granular denso
RS-14 SM ⁽³⁾	1	400 – 700	0.0 – 3.0	Material granular medianamente denso
	2	700 – 1500	3.0 – 25.0	Material granular denso
	3	1500 – 2000	7.5 – 25.0	Material granular muy denso
RS-15 SM ⁽³⁾	1	300 – 400	0.0 – 2.5	Material granular suelto
	2	400 – 700	2.5 – 8.0	Material granular medianamente denso
	3	700 – 1200	8.0 – 15.0	Material granular denso
RS-16 SM ⁽³⁾	1	200 – 400	0.0 – 5.0	Material granular suelto
	2	400 – 600	5.0 – 16.0	Material granular medianamente denso
RS-17 SM ⁽³⁾	1	200 – 400	0.0 – 3.0	Relleno
	2	400 – 700	3.0 – 9.0	Material granular medianamente denso
	3	> 700	9.0 – 15.0	Material granular denso
RS-18 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	4 – 8	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502 – 1110	12 – 25	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-19 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	1 – 8	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502 – 1110	8 – 16	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.

Código	Estrato sísmico	Vp (m/s)	Profundidad (m)	Descripción
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-20 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	1 – 5	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502 – 1110	5 – 10	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-21 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	2 – 4	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502 – 1110	25 – 30	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-22 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	2 – 7	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502 – 1110	20 – 26	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-23 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	2 – 4	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502 – 1110	9 – 18	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-24 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	3 – 4	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502 – 1110	6 – 9	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-25 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	3 – 6	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502 – 1110	21 – 23	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-26 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	6 – 8	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502 – 1110	21 – 24	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-27 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	3 – 5	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502 – 1110	20 – 24	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-28 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	4 – 8	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502 – 1110	14 – 15	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-29 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	2 – 4	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.

Código	Estrato sísmico	V _p (m/s)	Profundidad (m)	Descripción
RS-30 SM ⁽⁴⁾	2	502–1110	25 – 30	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
	1	350 – 502	2 – 3	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
RS-31 SM ⁽⁴⁾	2	502–1110	5 – 6	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
	1	350 – 502	2 – 4	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
RS-32 SM ⁽⁴⁾	2	502–1110	6 – 9	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
	1	350 – 502	2 – 5	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
RS-33 SM ⁽⁴⁾	2	502–1110	8 – 14	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
	1	350 – 502	2 – 5	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
RS-34 SM ⁽⁴⁾	2	502–1110	12 – 15	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
	1	350 – 502	2 – 4	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
RS-35 SM ⁽⁴⁾	2	502–1110	10 – 14	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
	1	350 – 502	3 – 4	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
RS-36 SM ⁽⁴⁾	2	502–1110	7 – 10	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
	1	350 – 502	2 – 4	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
RS-37 SM ⁽⁴⁾	2	502–1110	12 – 14	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
	1	350 – 502	3 – 5	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
RS-38 SM ⁽⁴⁾	2	502–1110	18 – 20	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
	1	350 – 502	3 – 4	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502–1110	7 – 8	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Código	Estrato sísmico	Vp (m/s)	Profundidad (m)	Descripción
RS-39 SM ⁽⁴⁾	1	350 – 502	5 – 6	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	502– 1110	12 – 14	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1110	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-40 SM ⁽⁴⁾	1	334 – 710	2 – 5	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
	2	830– 1467	18 – 20	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
	3	> 1586	-	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.
RS-41 SM ⁽²⁾	1	300- 700	0-8.4	Material granular medianamente denso
	2	>700	8.4-17.5	Material granular denso
RS-42 SM	1	300- 700	0-8.0	Material granular medianamente denso
	2	>700	8.0-17.5	Material granular denso
RS-43 SM	1	400- 700	0-4.3	Material granular medianamente denso
	2	>700	4.3-17.5	Material granular denso
RS-44 SM	1	300- 700	0-3.7	Material granular medianamente denso
	2	>700	3.7-17.5	Material granular denso
RS-45 SM ⁽²⁾	1	300- 700	0-8.0	Material granular medianamente denso
	2	>700	8.0-17.5	Material granular denso

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)
- (2) FUSIÓN DE ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING Y TECNOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA PARA LA MITIGACIÓN DE DESASTRES (CISMID, 2021)
- (3) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ZONAS UBICADAS EN LOS DISTRITOS DE: SAN JUAN DE MIRAFLORES, SANTA ROSA, SAN MIGUEL (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), CARMEN DE LA LEGUA REYNOSO (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO). (CISMID, 2015)
- (4) Evaluación Geofísica de los Acantilados de la Costa Verde Distrito de San Miguel (IGP, 2021)
- (5) Estudio Geotécnico Sísmico de la Estabilidad del Talud del Acantilado de la Costa Verde, considerando la amenaza por Tsunami y el Comportamiento estructural de las Edificaciones ubicadas sobre el Acantilado (Convenio UNI-FONDES, 2021)

Tabla N°28. Ubicación y Vs30 de Ensayo MASW y MAM

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Coordenadas UTM		Vs30 (m/s)
				Este (m)	Norte (m)	
MASW-01 LP ⁽¹⁾	MASW-01	La Perla	2016	268719.97	8664529.69	339
MASW-02 LP ⁽¹⁾	MASW-02	La Perla	2016	268455.59	8664762.34	399
MASW-03 LP ⁽¹⁾	MASW-03	La Perla	2016	269231.93	8665262.1	382
MASW-04 LP ⁽¹⁾	MASW-04	La Perla	2016	269388.09	8664784.73	352
MASW-05 LP ⁽¹⁾	MASW-05	La Perla	2016	269370.28	8664425.74	342
MASW-06 LP ⁽¹⁾	MASW-06	La Perla	2016	270121.35	8664149.7	322
MASW-07 LP ⁽¹⁾	MASW-07	La Perla	2016	270350.21	8664961.79	347
MASW-08 LP ⁽¹⁾	MASW-08	La Perla	2016	270683.75	8665108.32	353
MASW-09 LP	-	La Perla	2021	268641.2	8665075.39	379
MASW-10 LP	-	La Perla	2021	268995.22	8664968.45	372
MASW-11 LP	-	La Perla	2021	269954.78	8665132.47	350
MASW-12 LP	-	La Perla	2021	269945.63	8664776.58	335
MASW-13 LP	-	La Perla	2021	270452.79	8664420.95	362
MASW-14 LP	-	La Perla	2021	269919.51	8664400.58	386
MASW-15 LP ⁽²⁾	MASW-09	La Perla	2021	269335	8664345	365
MASW-01 SM ⁽³⁾	MASW-01	San Miguel	2015	270788.34	8663531.75	341
MASW-02 SM ⁽³⁾	MASW-02	San Miguel	2015	271140.74	8663829.46	337
MASW-03 SM ⁽³⁾	MASW-03	San Miguel	2015	270897.69	8664280.39	404
MASW-04 SM ⁽³⁾	MASW-04	San Miguel	2015	271230.71	8665245.63	397
MASW-05 SM ⁽³⁾	MASW-05	San Miguel	2015	271892.54	8664959.35	547
MASW-06 SM ⁽³⁾	MASW-06	San Miguel	2015	271581.22	8663747.2	539
MASW-07 SM ⁽³⁾	MASW-07	San Miguel	2015	273899.08	8662179.24	508
MASW-08 SM ⁽³⁾	MASW-08	San Miguel	2015	273733.69	8662777.72	580
MASW-09 SM ⁽³⁾	MASW-09	San Miguel	2015	272893.81	8663359.11	555
MASW-10 SM ⁽³⁾	MASW-10	San Miguel	2015	273600.83	8663796.81	634
MASW-11 SM ⁽³⁾	MASW-11	San Miguel	2015	271849.29	8664520.62	439
MASW-12 SM ⁽³⁾	MASW-12	San Miguel	2015	271618.58	8664399.79	425
MASW-13 SM ⁽³⁾	MASW-13	San Miguel	2015	272883.19	8664351.69	587
MASW-14 SM ⁽³⁾	MASW-14	San Miguel	2015	273643.71	8665448.39	649
MASW-15 SM ⁽³⁾	MASW-15	San Miguel	2015	273640	8662231	569
MASW-16 SM ⁽³⁾	MASW-16	San Miguel	2015	272421	8662794	380
MASW-17 SM ⁽³⁾	MASW-17	San Miguel	2015	272226	8662878	387
MASW-18 SM ⁽⁴⁾	LS01-SM	San Miguel	2021	270708	8663539	347
MASW-19 SM ⁽⁴⁾	LS02-SM	San Miguel	2021	271483	8663186	391
MASW-20 SM ⁽⁴⁾	LS03-SM	San Miguel	2021	271535	8663058	384
MASW-21 SM ⁽⁴⁾	LS04-SM	San Miguel	2021	272923	8662882	361
MASW-22 SM ⁽⁴⁾	LS05-SM	San Miguel	2021	272940	8662571	388
MASW-23 SM ⁽⁴⁾	LS06-SM	San Miguel	2021	272893	8662453	392
MASW-24 SM ⁽⁴⁾	LS07-SM	San Miguel	2021	271620	8663459	370
MASW-25 SM ⁽⁴⁾	LS08-SM	San Miguel	2021	273653	8662498	513
MASW-26 SM ⁽⁴⁾	LS09-SM	San Miguel	2021	273657	8662211	428
MASW-27 SM ⁽⁴⁾	LS10-SM	San Miguel	2021	273511	8662112	515
MASW-28 SM ⁽⁴⁾	LS11-SM	San Miguel	2021	270136	8663993	357
MASW-29 SM ⁽⁴⁾	LS12-SM	San Miguel	2021	270483	8663767	342
MASW-30 SM ⁽⁴⁾	LS13-SM	San Miguel	2021	270906	8663506	346
MASW-31 SM ⁽⁴⁾	LS14-SM	San Miguel	2021	271387	8663303	401
MASW-32 SM ⁽⁴⁾	LS15-SM	San Miguel	2021	271862	8663146	396
MASW-33 SM ⁽⁴⁾	LS16-SM	San Miguel	2021	272153	8663025	399
MASW-34 SM ⁽⁴⁾	LS17-SM	San Miguel	2021	272131	8662970	373
MASW-35 SM ⁽⁴⁾	LS18-SM	San Miguel	2021	272524	8662871	351
MASW-36 SM ⁽⁴⁾	LS19-SM	San Miguel	2021	273110	8662551	319
MASW-37 SM ⁽⁴⁾	LS20-SM	San Miguel	2021	273263	8662408	349
MASW-38 SM ⁽⁴⁾	LS21-SM	San Miguel	2021	273556	8662287	424
MASW-39 SM ⁽⁴⁾	LS22-SM	San Miguel	2021	270696	8663604	351
MASW-40 SM ⁽⁵⁾	MASW-05	San Miguel	2021	272812.06	8662611.81	351
MASW-41 SM	-	San Miguel	2021	271976.86	8663508.51	472
MASW-42 SM	-	San Miguel	2021	272820.18	8663067.44	447

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Coordenadas UTM		Vs30 (m/s)
				Este (m)	Norte (m)	
MASW-43 SM	-	San Miguel	2021	273591.99	8662481.38	559
MASW-44 SM	-	San Miguel	2021	273673.64	8663330.69	538
MASW-45 SM	-	San Miguel	2021	272473.33	8663764.66	442
MASW-46 SM	-	San Miguel	2021	271899.26	8665423.67	424
MASW-47 SM ⁽²⁾	MASW-27	San Miguel	2021	271919	8663117	442

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)
- (2) FUSIÓN DE ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING Y TECNOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA PARA LA MITIGACIÓN DE DESASTRES (CISMID, 2021)
- (3) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ZONAS UBICADAS EN LOS DISTRITOS DE: SAN JUAN DE MIRAFLORES, SANTA ROSA, SAN MIGUEL (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), CARMEN DE LA LEGUA REYNOSO (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO). (CISMID, 2015)
- (4) Evaluación Geofísica de los Acantilados de la Costa Verde Distrito de San Miguel (IGP, 2021)
- (5) Estudio Geotécnico Sísmico de la Estabilidad del Talud del Acantilado de la Costa Verde, considerando la amenaza por Tsunami y el Comportamiento estructural de las Edificaciones ubicadas sobre el Acantilado (Convenio UNI-FONDES, 2021)

Tabla N°29. Perfiles Vs de Ensayo de MASW y MAM

Código	Estrato sísmico	Vs (m/s)	Espesor (m)	Descripción
MASW-01 LP ⁽¹⁾	1	160 - 184	2.3	Material fino de consistencia blanda
	2	231 - 378	13.3	Material fino de consistencia media
	3	410 - 500	14.4	Materia granular denso
MASW-02 LP ⁽¹⁾	1	194 - 231	3.7	Material fino de consistencia blanda
	2	327 - 349	5.2	Material granular medianamente denso
	3	369 - 582	21.1	Material granular denso
MASW-03 LP ⁽¹⁾	1	155 - 194	2.3	Material fino de consistencia blanda
	2	260 - 301	4.7	Material fino de consistencia media
	3	353 - 571	23	Materia granular denso
MASW-04 LP ⁽¹⁾	1	194 - 203	2.3	Material fino de consistencia blanda
	2	239 - 258	4.7	Material fino de consistencia media
	3	359 - 483	23	Materia granular denso
MASW-05 LP ⁽¹⁾	1	164 - 196	2.3	Material fino de consistencia blanda
	2	219 - 339	6.6	Material fino de consistencia media
	3	358 - 468	21.1	Materia granular denso
MASW-06 LP ⁽¹⁾	1	169	1.1	Material fino de consistencia blanda
	2	211 - 314	9.9	Material fino de consistencia media
	3	331 - 433	19	Materia granular denso
MASW-07 LP ⁽¹⁾	1	165 - 185	2.3	Material fino de consistencia blanda
	2	223 - 286	4.7	Material fino de consistencia media
	3	313 - 512	23	Materia granular denso

Código	Estrato sísmico	V _s (m/s)	Espesor (m)	Descripción
MASW-08 LP ⁽¹⁾	1	123 - 160	2.3	Material fino de consistencia blanda
	2	255 - 284	4.7	Material granular medianamente denso
	3	322 - 602	23	Material granular denso
MASW-09 LP	1	164 - 196	3.7	Material fino de consistencia blanda
	2	298	1.6	Material fino de consistencia media
	3	373 - 681	24.7	Material granular denso
MASW-10 LP	1	191 - 192	3.7	Material fino de consistencia blanda
	2	256 - 365	5.2	Material fino de consistencia media
	3	396 - 633	21.1	Material granular denso
MASW-11 LP	1	151 - 202	3.7	Material fino de consistencia blanda
	2	272 - 346	5.2	Material fino de consistencia media
	3	361 - 556	21.1	Material granular denso
MASW-12 LP	1	137 - 196	3.7	Material fino de consistencia blanda
	2	292 - 349	3.3	Material fino de consistencia media
	3	368 - 568	21	Material granular denso
MASW-13 LP	1	227 - 350	15.6	Material fino de consistencia media
	2	385 - 644	14.4	Material granular denso
MASW-14 LP	1	185 - 189	2.3	Material fino de consistencia blanda
	2	230 - 422	15.8	Material fino de consistencia media
	3	492 - 694	11.9	Material granular denso
MASW-15 LP ⁽²⁾	1	177	2.3	Suelo suelto
	2	212 - 329	6.6	Suelo medianamente denso
	3	361 - 520	21.1	Suelo denso
MASW-01 SM ⁽³⁾	1	178	1	Relleno
	2	208 - 363	14.6	Material granular medianamente denso
	3	394 - 533	-	Material granular denso
MASW-02 SM ⁽³⁾	1	148	1	Relleno
	2	194 - 360	12	Material granular medianamente denso
	3	400 - 634	-	Material granular denso
MASW-03 SM ⁽³⁾	1	151	1	Relleno
	2	194 - 355	8	Material granular medianamente denso
	3	412 - 661	-	Material granular denso
MASW-04 SM ⁽³⁾	1	158	1	Relleno
	2	204 - 336	4.3	Material granular medianamente denso
	3	372 - 551	-	Material granular denso
MASW-05 SM ⁽³⁾	1	325	1	Material granular medianamente denso
	2	381 - 681	-	Material granular denso
MASW-06 SM ⁽³⁾	1	227 - 305	2.3	Material granular medianamente denso
	2	379 - 769	-	Material granular denso
MASW-07 SM ⁽³⁾	1	253 - 303	2.3	Material granular medianamente denso
	2	383 - 680	-	Material granular denso
MASW-08 SM ⁽³⁾	1	284 - 360	2.3	Material granular medianamente denso
	2	412 - 749	21.4	Material granular denso
	3	784 - 836	-	Material granular muy denso
MASW-09 SM ⁽³⁾	1	263 - 317	2.3	Material granular medianamente denso
	2	391 - 749	-	Material granular denso
MASW-10 SM ⁽³⁾	1	349	1	Material granular medianamente denso
	2	394 - 747	19.8	Material granular denso
	3	790 - 872	-	Material granular muy denso
MASW-11 SM ⁽³⁾	1	176 - 320	5.2	Material granular medianamente denso
	2	369 - 679	-	Material granular denso
MASW-12 SM ⁽³⁾	1	172	1	Relleno
	2	210 - 340	6	Material granular medianamente denso
	3	386 - 689	-	Material granular denso
MASW-13 SM ⁽³⁾	1	328 - 359	2.3	Material granular medianamente denso
	2	409 - 744	24.4	Material granular denso
	3	778	-	Material granular muy denso

Código	Estrato sísmico	V _s (m/s)	Espesor (m)	Descripción
MASW-14 SM ⁽³⁾	1	320 – 343	2.3	Material granular medianamente denso
	2	408 – 726	13.3	Material granular denso
	3	763 – 896	-	Material granular muy denso
MASW-15 SM ⁽³⁾	1	186-242	2.3	Material granular medianamente denso
	2	380 – 749	18.5	Material granular denso
	3	794 – 856	-	Material granular muy denso
MASW-16 SM ⁽³⁾	1	167	1	Material granular suelto
	2	192 – 345	9	Material granular medianamente denso
	3	379 – 571	-	Material granular denso
MASW-17 SM ⁽³⁾	1	173	1	Relleno
	2	207-345	9	Material granular medianamente denso
	3	387 – 602	-	Material granular denso
MASW-18 SM ⁽⁴⁾	1	266	4	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	330	19	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	3	541	24	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	479	18	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	5	604	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-19 SM ⁽⁴⁾	1	234	4	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	331	14	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	3	655	26	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	493	14	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	5	746	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-20 SM ⁽⁴⁾	1	283	7	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	386	13	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	553	17	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	660	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-21 SM ⁽⁴⁾	1	214	5	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	430	29	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	596	16	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	711	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-22 SM ⁽⁴⁾	1	255	5	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	417	20	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	600	32	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	741	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-23 SM ⁽⁴⁾	1	242	5	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	387	15	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	645	14	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	797	24	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	5	665	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-24 SM ⁽⁴⁾	1	202	4	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	422	27	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	572	19	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)

Código	Estrato sísmico	V _s (m/s)	Espesor (m)	Descripción
	4	686	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-25 SM ⁽⁴⁾	1	343	5	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	551	8	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	3	487	5	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	4	669	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-26 SM ⁽⁴⁾	1	266	4	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	395	9	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	537	27	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	745	21	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	5	864	-	Aluvial muy compacto (800 – 1500 m/s)
MASW-27 SM ⁽⁴⁾	1	283	9	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	677	11	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	3	1035	17	Aluvial muy compacto (800 – 1500 m/s)
	4	1259	-	Aluvial muy compacto (800 – 1500 m/s)
MASW-28 SM ⁽⁴⁾	1	210	4	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	311	7	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	3	436	17	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	4	613	-	Aluvial muy compacto (800 – 1500 m/s)
MASW-29 SM ⁽⁴⁾	1	219	5	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	337	10	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	3	428	13	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	4	490	-	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
MASW-30 SM ⁽⁴⁾	1	235	3	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	327	12	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	3	414	-	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
MASW-31 SM ⁽⁴⁾	1	303	5	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	440	32	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	611	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-32 SM ⁽⁴⁾	1	285	5	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	429	23	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	610	15	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	771	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-33 SM ⁽⁴⁾	1	252	4	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	431	24	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	607	33	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	695	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)

Código	Estrato sísmico	V _s (m/s)	Espesor (m)	Descripción
MASW-34 SM ⁽⁴⁾	1	237	7	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	434	18	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	581	25	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	708	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-35 SM ⁽⁴⁾	1	250	7	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	377	18	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	651	25	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	784	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-36 SM ⁽⁴⁾	1	223	9	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	342	11	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	3	494	-	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
MASW-37 SM ⁽⁴⁾	1	246	9	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	417	19	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	783	19	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	1025	-	Aluvial muy compacto (800 – 1500 m/s)
MASW-38 SM ⁽⁴⁾	1	240	5	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	417	8	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	3	566	21	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	4	695	20	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	5	904	-	Aluvial muy compacto (800 – 1500 m/s)
MASW-39 SM ⁽⁴⁾	1	200	4	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	2	274	7	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	3	362	26	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	4	543	-	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
MASW-40SM ⁽⁵⁾	1	190 - 357	11	Suelo de consistencia medianamente densa a densa
	2	380 - 521	19	Material compacto a muy compacto
MASW-41SM	1	186 - 182	2.3	Material fino de consistencia blanda
	2	207 - 304	2.9	Material fino de consistencia media
	3	416 - 759	18.5	Material granular denso
	4	835 - 1034	6.3	Material granular muy denso
MASW-42S M	1	191 - 239	3.7	Material fino de consistencia blanda
	2	330 - 724	23.1	Material granular denso
	3	815	3.2	Material granular muy denso
MASW-43 SM	1	249 - 274	2.3	Material fino de consistencia media
	2	319 - 606	15.8	Material granular denso
	3	718 - 1119	11.9	Material granular muy denso
MASW-44 SM	1	237 - 243	2.3	Material de relleno
	2	317 - 724	21.4	Material granular denso
	3	825 - 924	6.3	Material granular muy denso
MASW-45 SM	1	191 - 260	3.7	Material fino de consistencia blanda
	2	362 - 657	23.1	Material granular denso
	3	827	3.2	Material granular muy denso
MASW-46 SM	1	192 - 195	2.3	Material fino de consistencia blanda

Código	Estrato sísmico	Vs (m/s)	Espesor (m)	Descripción	
MASW-47 SM ⁽⁶⁾	2	257 - 667	27.7	Material granular denso	
	1	189 - 355	5.3	Suelo medianamente denso	
	2	390 - 578	24.7	Suelo denso	

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)
- (2) FUSIÓN DE ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING Y TECNOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA PARA LA MITIGACIÓN DE DESASTRES (CISMID, 2021)
- (3) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ZONAS UBICADAS EN LOS DISTRITOS DE: SAN JUAN DE MIRAFLORES, SANTA ROSA, SAN MIGUEL (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), CARMEN DE LA LEGUA REYNOSO (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO). (CISMID, 2015)
- (4) Evaluación Geofísica de los Acantilados de la Costa Verde Distrito de San Miguel (IGP, 2021)
- (5) Estudio Geotécnico Sísmico de la Estabilidad del Talud del Acantilado de la Costa Verde, considerando la amenaza por Tsunami y el Comportamiento estructural de las Edificaciones ubicadas sobre el Acantilado (Convenio UNI-FONDES, 2021)

Tabla N° 30. Ubicación de Arreglos de Microtremores

Código	Nombre de origen	Distrito	Año	Coordenadas UTM	
				Este (m)	Norte (m)
AM-01 LP ⁽¹⁾	A-01	La Perla	2016	269362.26	8664435.86
AM-02 LP ⁽¹⁾	A-02	La Perla	2016	268005.00	8664788.00
AM-03 LP ⁽²⁾	La Perla	La Perla	2018	269337.00	8664288.00
AM-04 LP	-	La Perla	2021	270206.23	8664327.66
AM-01 SM ⁽³⁾	A-01	San Miguel	2015	270679.24	8663539.05
AM-02 SM ⁽³⁾	A-02	San Miguel	2015	273650.00	8662225.00
AM-03 SM ⁽⁴⁾	PUCP	San Miguel	2014	273632.00	8664470.00
AM-04 SM ⁽⁵⁾	LEY01	San Miguel	2018	272959.00	8664965.00
AM-05 SM	-	San Miguel	2021	271914.84	8664550.00
AM-06 SM	-	San Miguel	2021	272916.11	8663220.19

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)

- (2) Vs PROFILES, H/V SPECTRA AND GEOTECHNICAL CLASSIFICATION AS PROXIES OF THE SOIL DYNAMIC BEHAVIOR IN LIMA, PERU (Gonzales C. et al, 2020)
- (3) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ZONAS UBICADAS EN LOS DISTRITOS DE: SAN JUAN DE MIRAFLORES, SANTA ROSA, SAN MIGUEL (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), CARMEN DE LA LEGUA REYNOSO (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO). (CISMID, 2015)
- (4) Evaluation of Local Site Amplification in Lima, Peru using Earthquake Ground Motion Records (Quispe, 2015)
- (5) Los depósitos de grava presentan amplificaciones importantes en periodos largos, ¿una realidad? (Quispe et al, 2018)

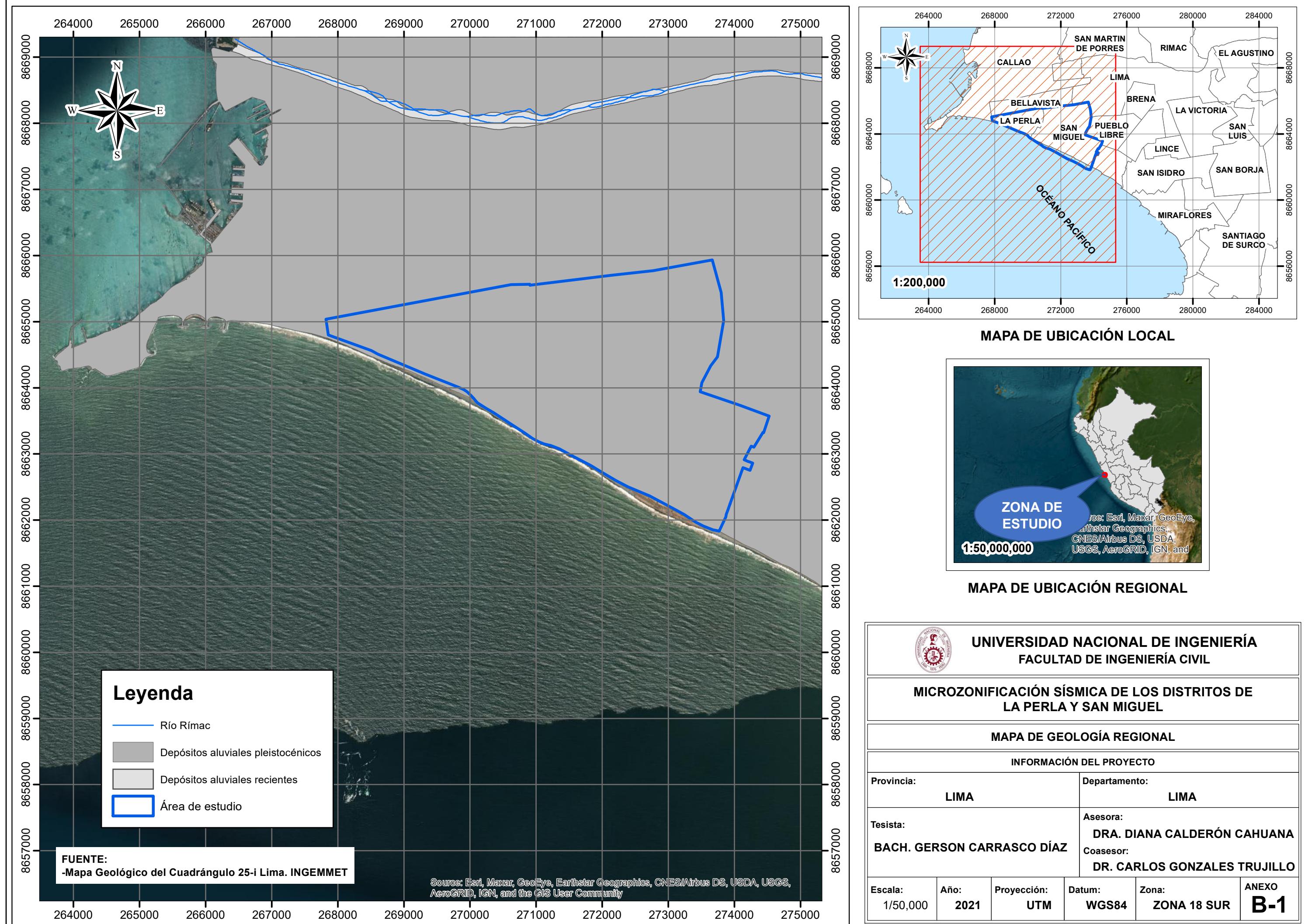
Tabla N°31. Tabla de perfiles profundos de Arreglos de Microtremores

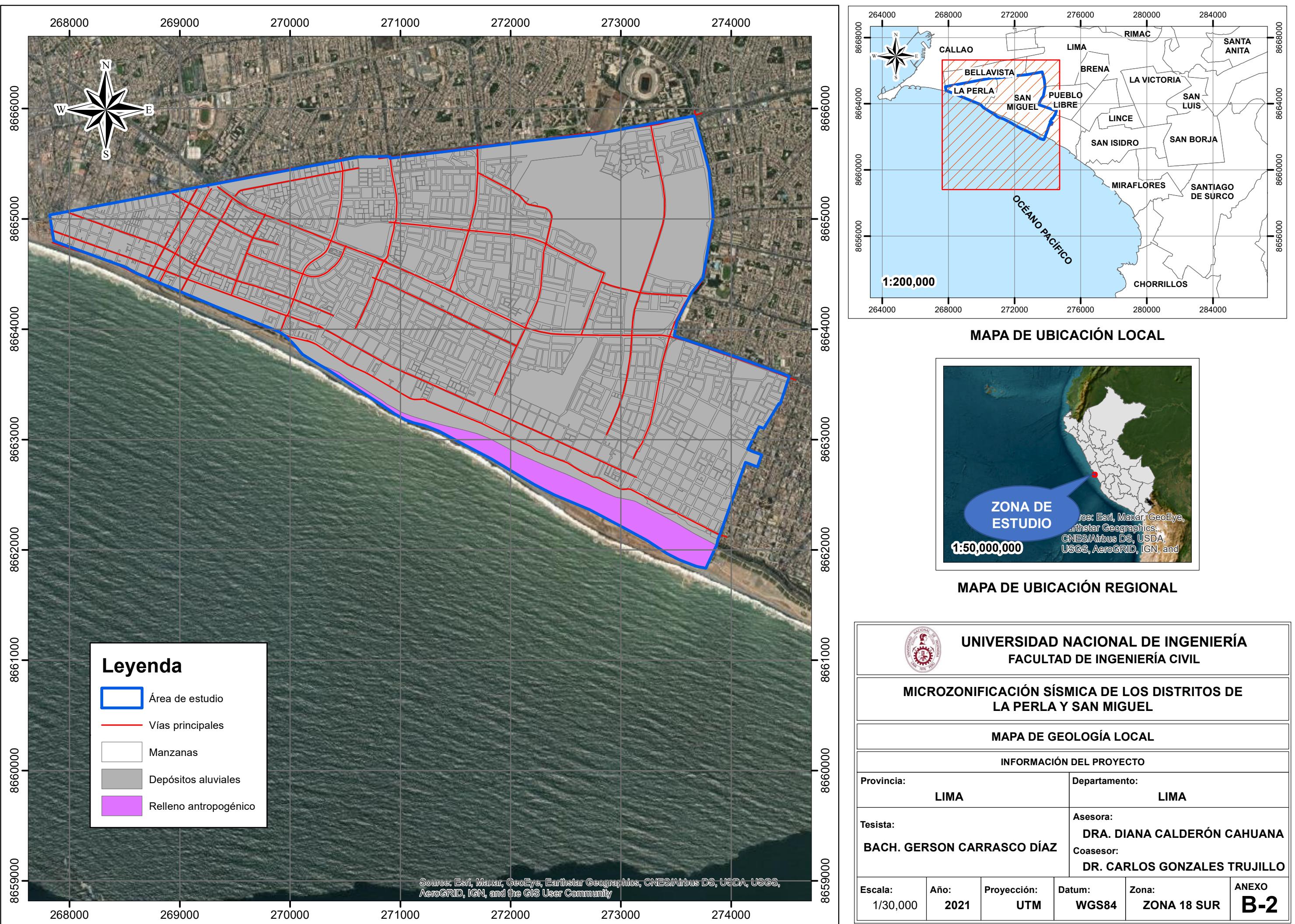
Código	Estrato sísmico	Vs (m/s)	Espesor (m)
AM-01 LP ⁽¹⁾	1	200	2.5
	2	250	3.5
	3	350	4
	4	400	20
	5	450	10
	6	600	-
AM-02 LP ⁽¹⁾	1	150	4
	2	270	1
	3	370	1
	4	390	1
	5	400	1
	6	410	1
	7	420	1
	8	430	2
	9	450	-
AM-03 LP ⁽²⁾	1	175	2.6
	2	256	6.4
	3	367	33.8
	4	643	17.7
	5	814	33.6
	6	580	44.5
	7	825	33.9
	8	1482	32.8
	9	2203	-
AM-04 LP	1	176	1.6
	2	272	11.5
	3	379	25.7
	4	595	82.1
	5	828	76.7
	6	1042	48.7
	7	1625	-
AM-01 SM ⁽³⁾	1	250	5
	2	300	7
	3	350	18
	4	420	18
	5	550	20
	6	700	-
AM-02 SM ⁽³⁾	1	230	1
	2	110	1

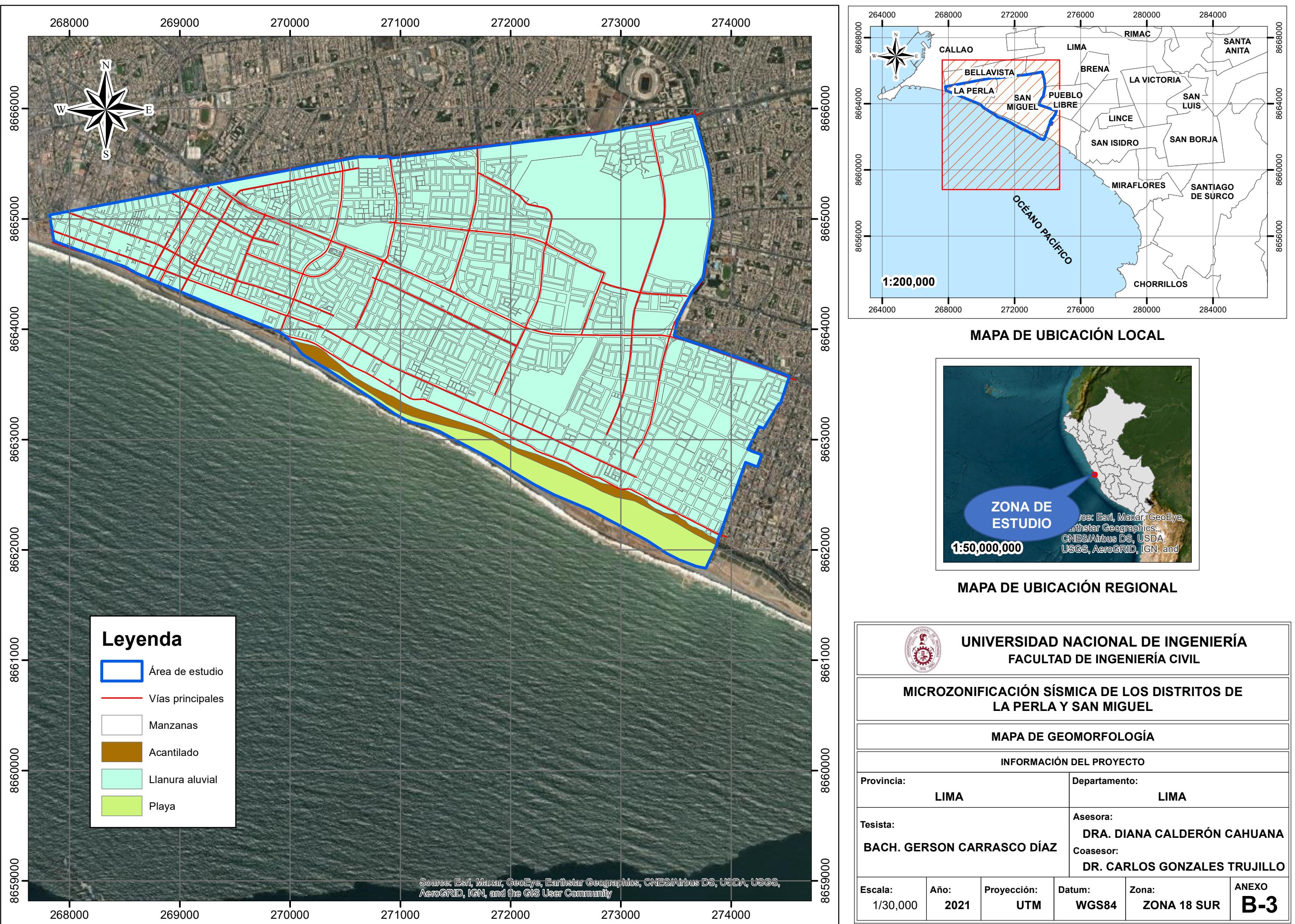
Código	Estrato sísmico	Vs (m/s)	Espesor (m)
AM-03 SM ⁽⁴⁾	3	350	5
	4	550	7
	5	800	-
AM-04 SM ⁽⁵⁾	1	362	7.7
	2	596	9.9
	3	884	28.5
	4	1038	153.8
	5	1503	82.9
	6	2412	-
AM-05 SM	1	370	2
	2	900	5.4
	3	1200	17
	4	925	44.2
	5	715	72.4
	6	3000	-
AM-06 SM	1	195.01	3.1
	2	355.96	6.3
	3	485.2	13.1
	4	641.06	56.8
	5	846.16	83.6
	6	1154.5	53.3
	7	1608	49.1
	8	2267.1	-
AM-06 SM	1	291.9	2.6
	2	542.43	37.2
	3	781.94	79.5
	4	1172.6	81.5
	5	1493.3	148.4
	6	2294.5	-

- (1) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LAS MUNICIPALIDADES DISTRITALES DE SANTIAGO DE SURCO, SANTA ANITA (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), LA PERLA (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO) Y MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE JAÉN (DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA). (CISMID, 2016)
- (2) Vs PROFILES, H/V SPECTRA AND GEOTECHNICAL CLASSIFICATION AS PROXIES OF THE SOIL DYNAMIC BEHAVIOR IN LIMA, PERU (Gonzales C. et al, 2020)
- (3) ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS ZONAS UBICADAS EN LOS DISTRITOS DE: SAN JUAN DE MIRAFLORES, SANTA ROSA, SAN MIGUEL (PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LIMA), CARMEN DE LA LEGUA REYNOSO (PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO). (CISMID, 2015)
- (4) Evaluation of Local Site Amplification in Lima, Peru using Earthquake Ground Motion Records (Quispe, 2015)
- (5) Los depósitos de grava presentan amplificaciones importantes en periodos largos, ¿una realidad? (Quispe et al, 2018)

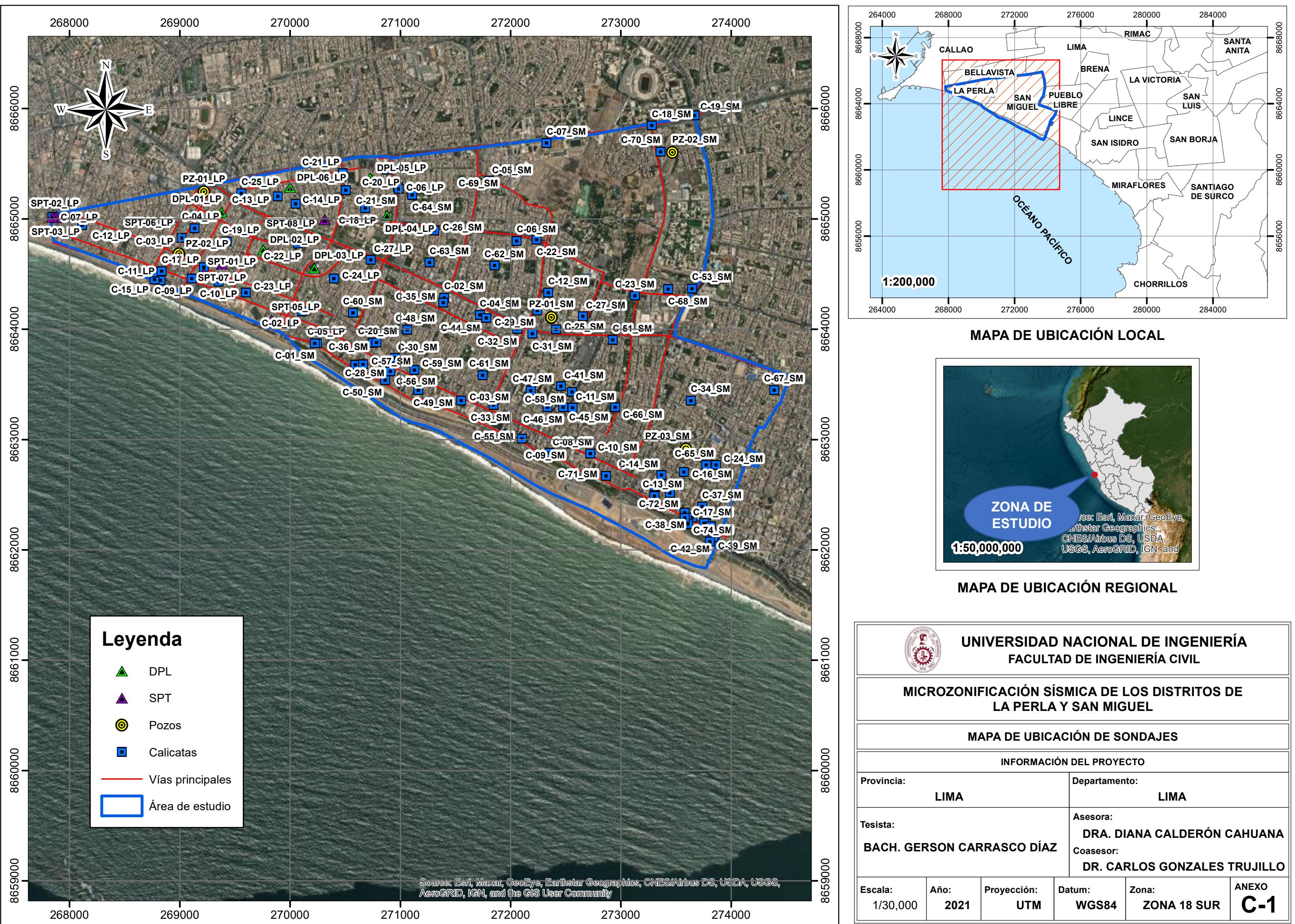
ANEXO B

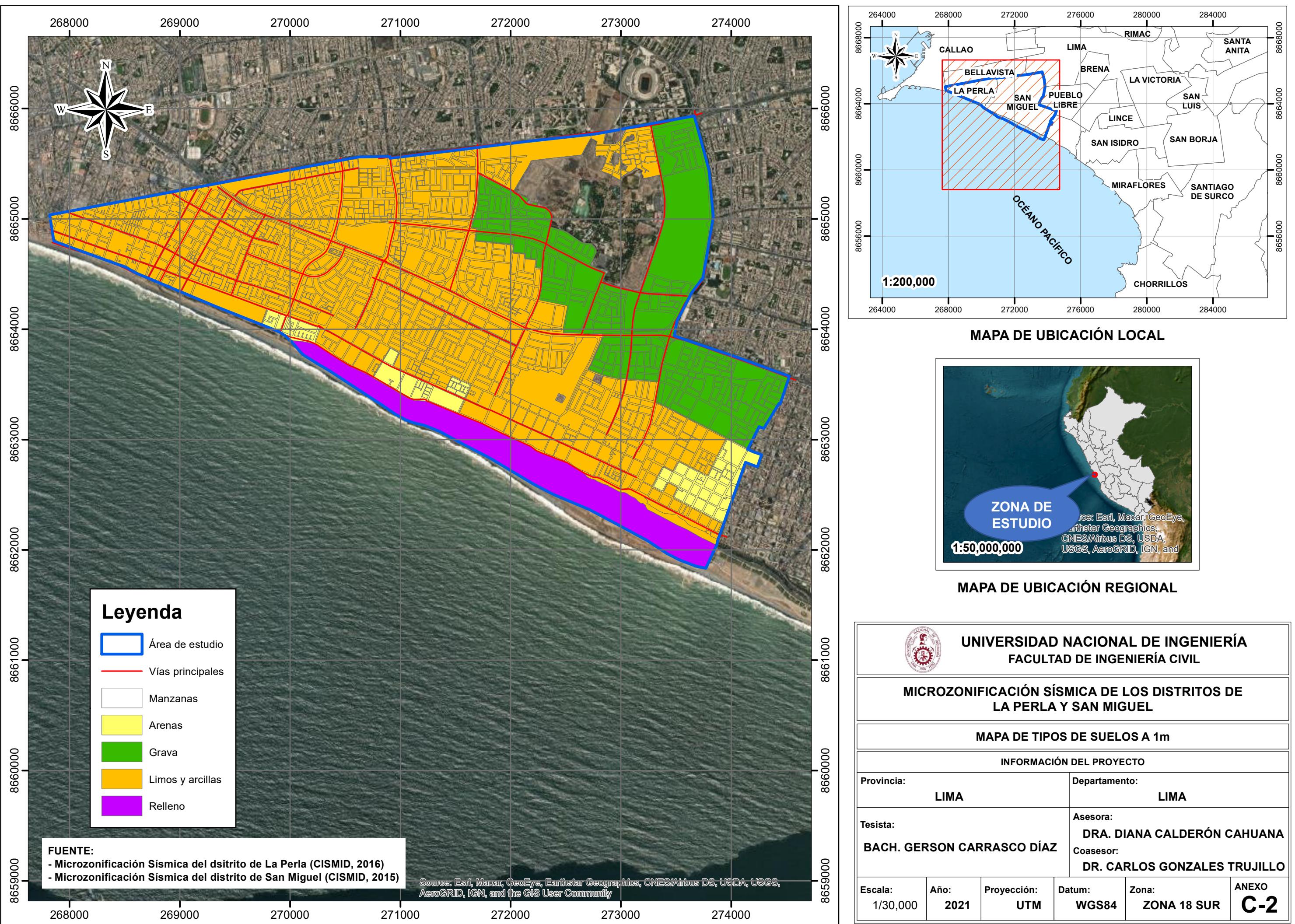


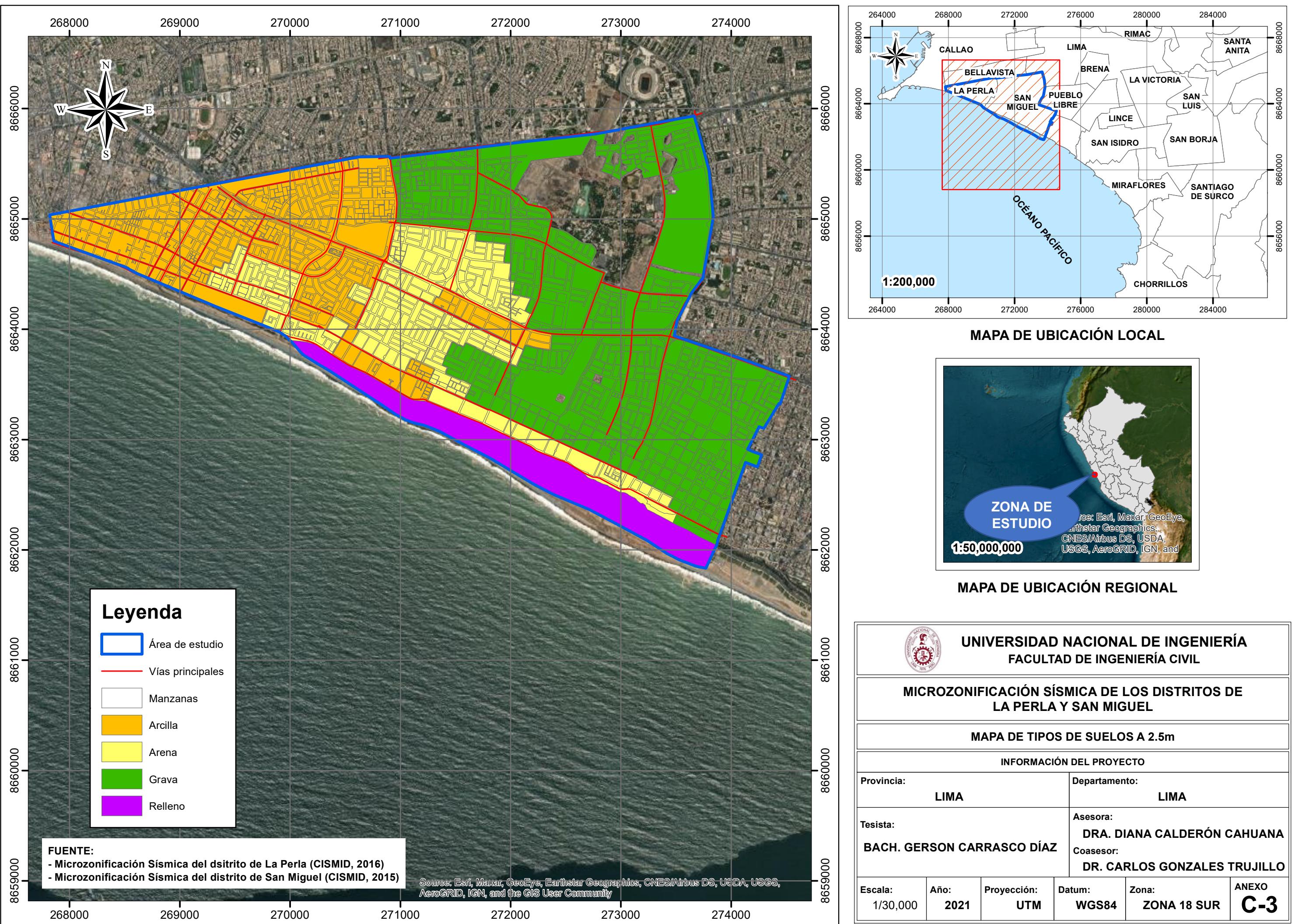




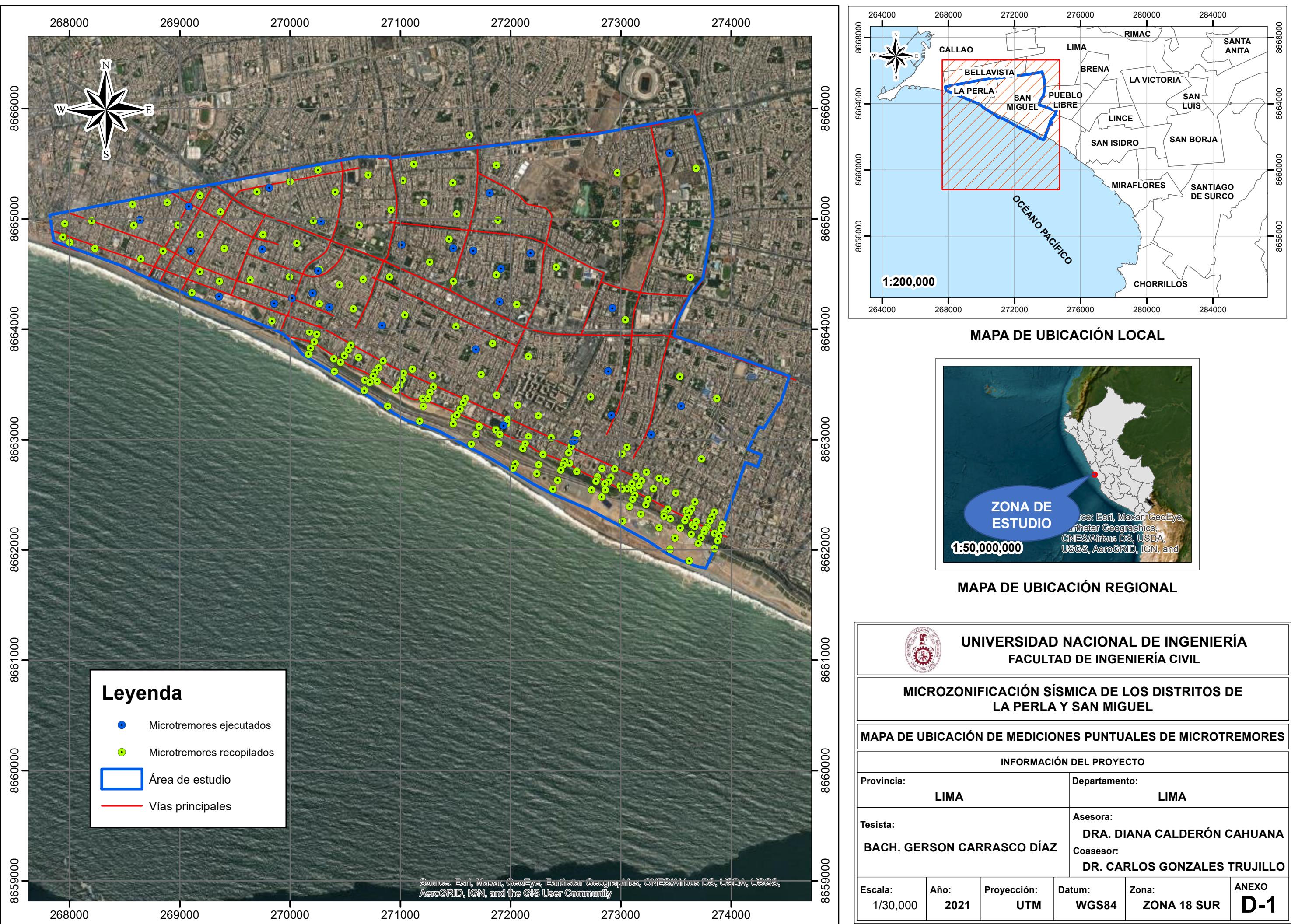
ANEXO C





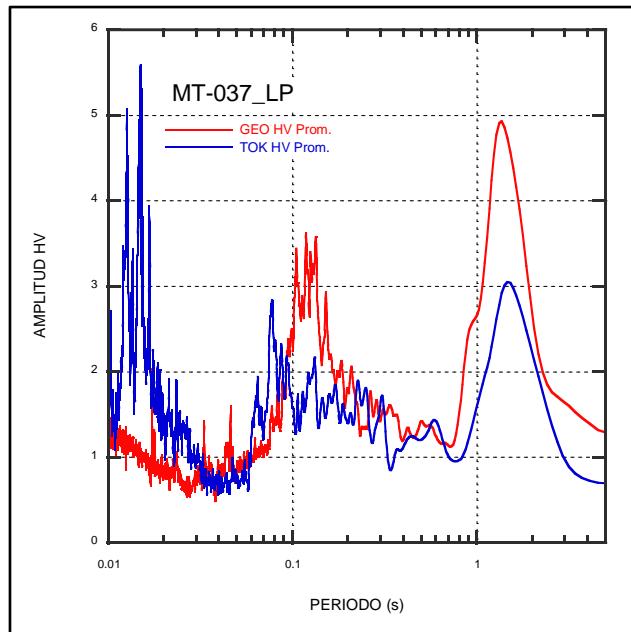


ANEXO D

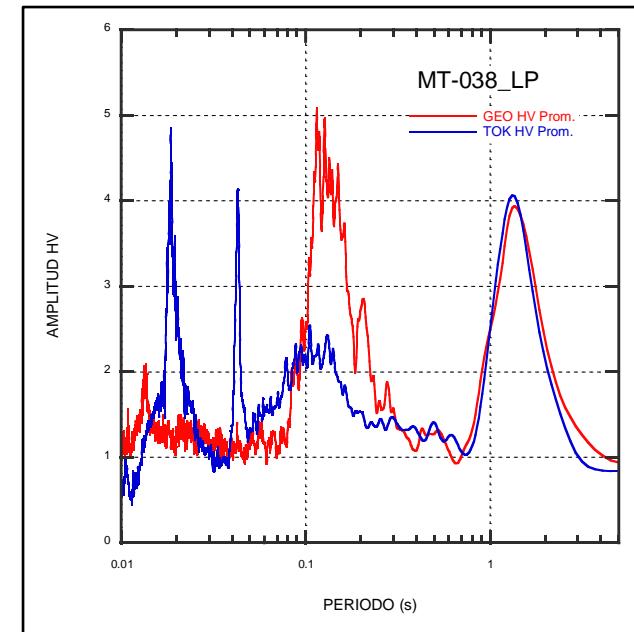


ANEXO D-2: ESPECTROS H/V

MT-037_LP (EJECUTADO)



MT-038_LP (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-037_LP

DISTRITO: La Perla

PERIODO T₀: 1.42 s

PERIODO T₁: 0.13 s

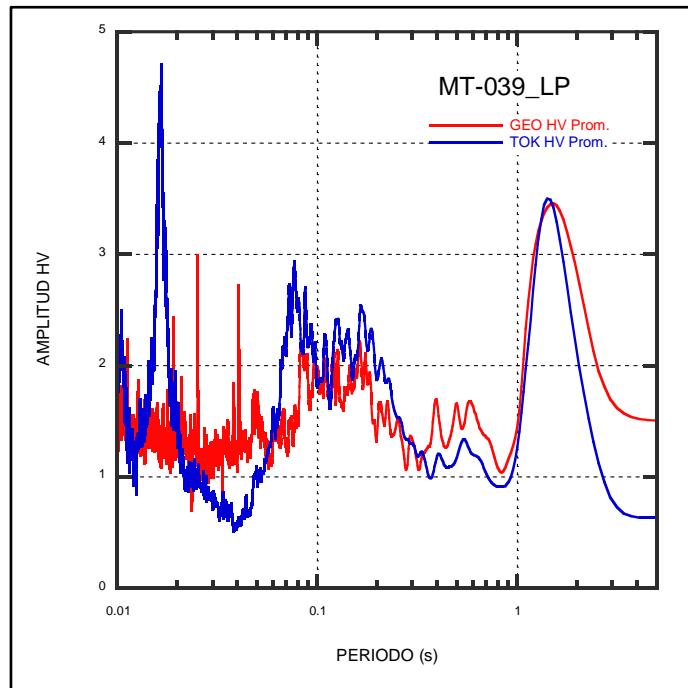
CÓDIGO: MT-038_LP

FECHA: 02/06/2021

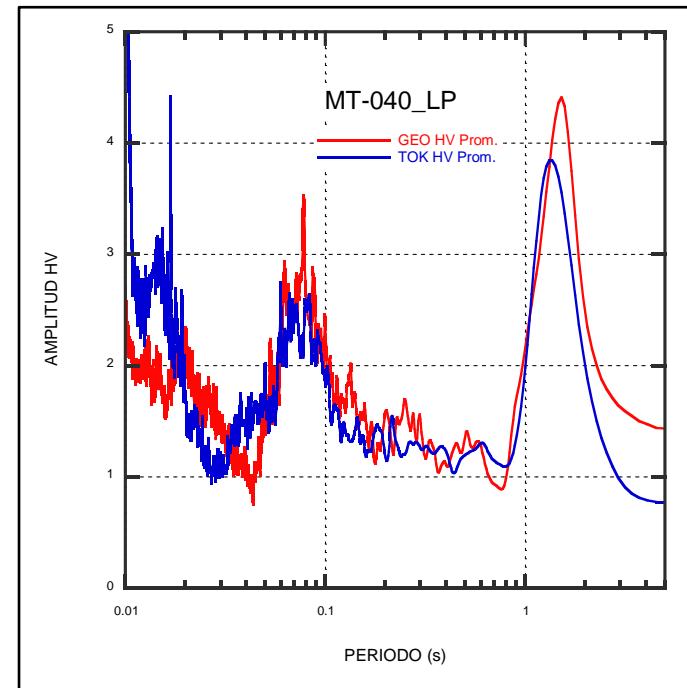
PERIODO T₀: 1.35 s

PERIODO T₁: 0.12 s

MT-039_LP (EJECUTADO)



MT-040_LP (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-039_LP

DISTRITO: La Perla

PERÍODO T_0 : 1.46 s

PERÍODO T_1 : 0.16

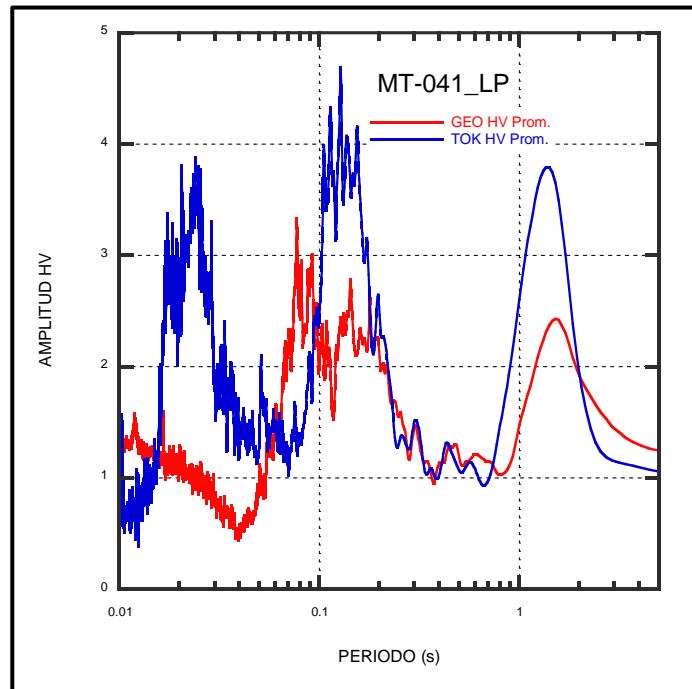
CÓDIGO: MT-040_LP

DISTRITO: La Perla

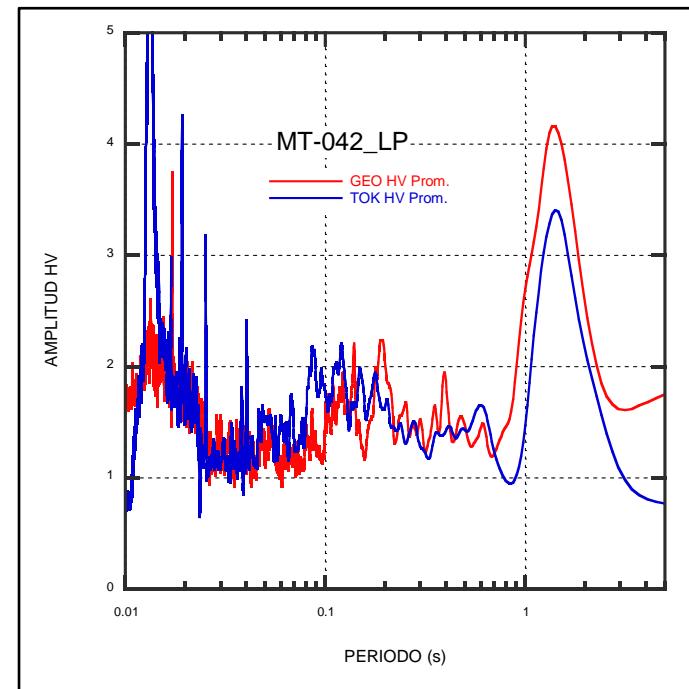
PERÍODO T_0 : 1.39 s

PERÍODO T_1 : < 0.10 s

MT-041_LP (EJECUTADO)



MT-042_LP (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-041_LP

DISTRITO: La Perla

PERIODO T₀: 1.40 s

PERIODO T₁: 0.14 s

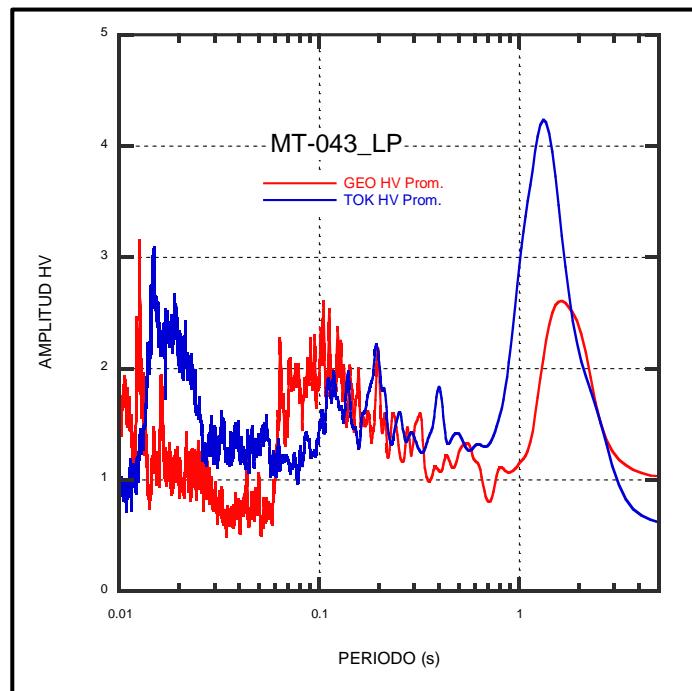
CÓDIGO: MT-042_LP

DISTRITO: La Perla

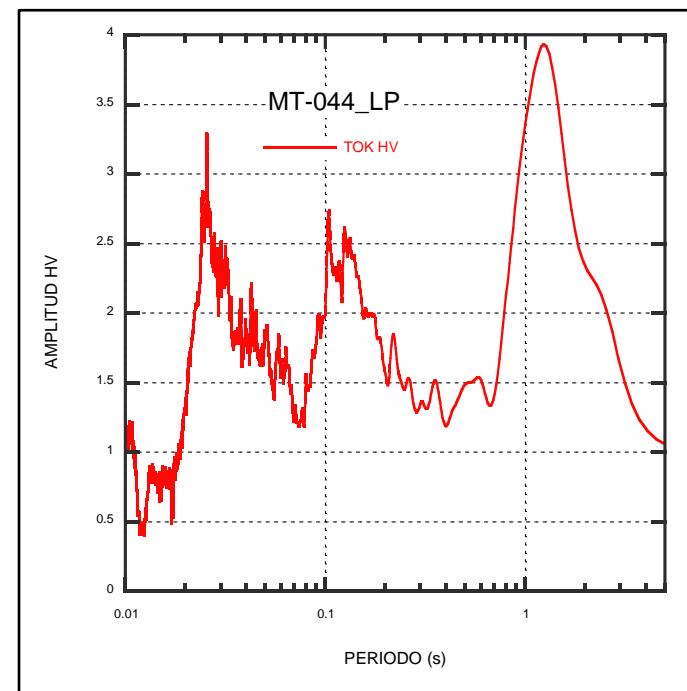
PERIODO T₀: 1.40 s

PERIODO T₁: 0.15 s

MT-043_LP (EJECUTADO)



MT-044_LP (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-043_LP

DISTRITO: La Perla

PERIODO T_0 : 1.40 s

PERIODO T_1 : 0.11 s

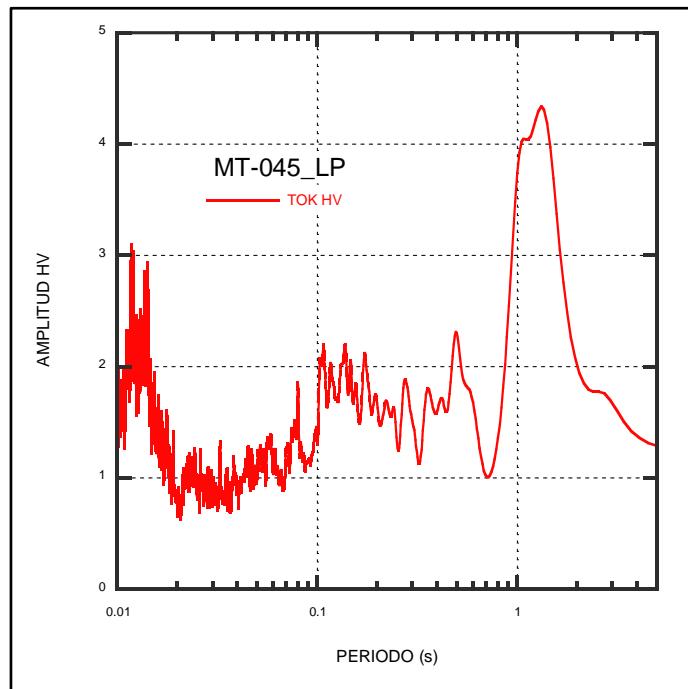
CÓDIGO: MT-044_LP

DISTRITO: La Perla

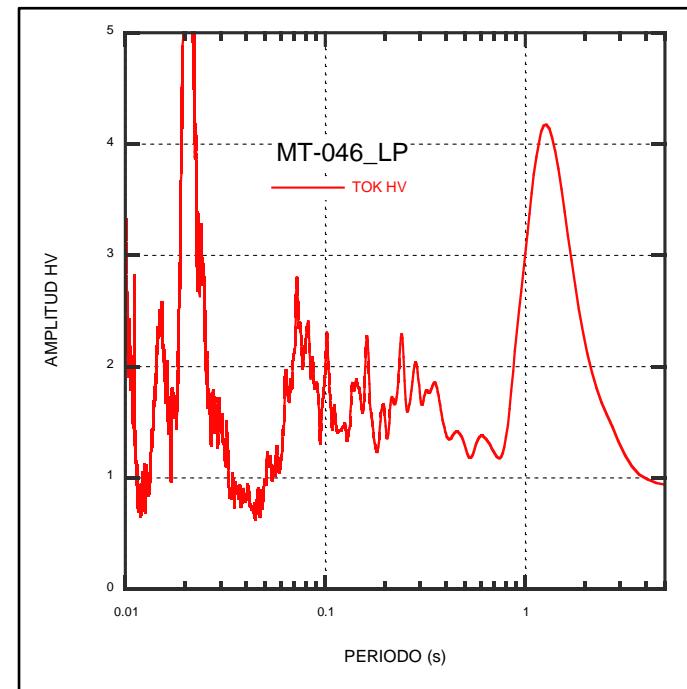
PERIODO T_0 : 1.23 s

PERIODO T_1 : 0.11 s

MT-045_LP (EJECUTADO)



MT-046_LP (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-045_LP

DISTRITO: La Perla

PERIODO T₀: 1.29 s

PERIODO T₁: 0.14 s

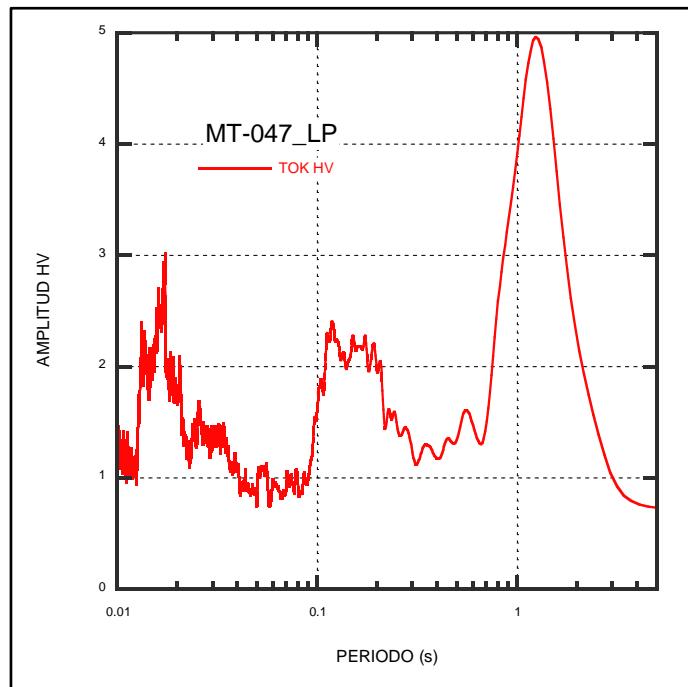
CÓDIGO: MT-046_LP

DISTRITO: La Perla

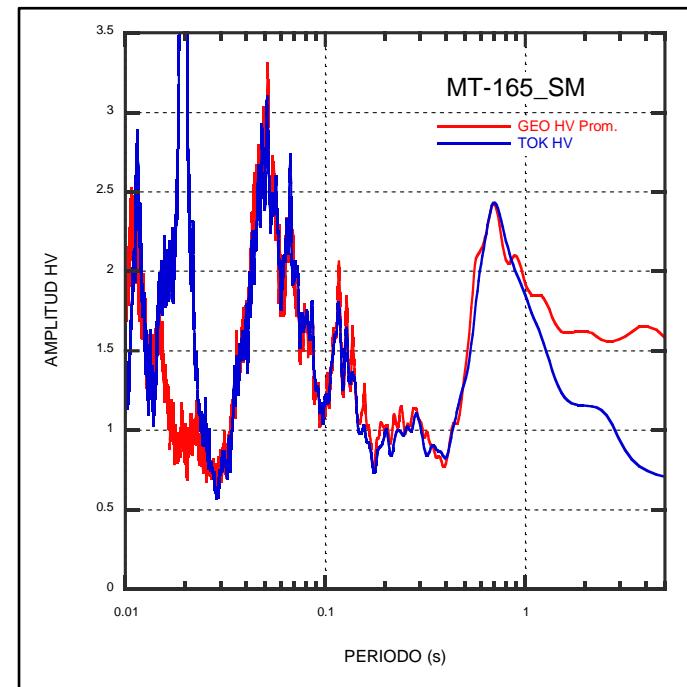
PERIODO T₀: 1.30 s

PERIODO T₁: < 0.10 s

MT-047_LP (EJECUTADO)



MT-165_SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-047_LP

DISTRITO: La Perla

PERIODO T_0 : 1.26 s

PERIODO T_1 : 0.14 s

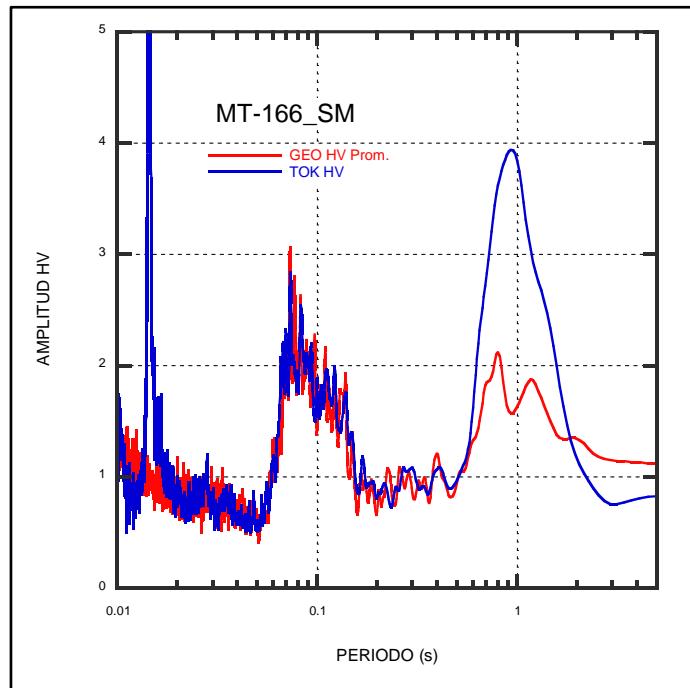
CÓDIGO: MT-165_SM

DISTRITO: San Miguel

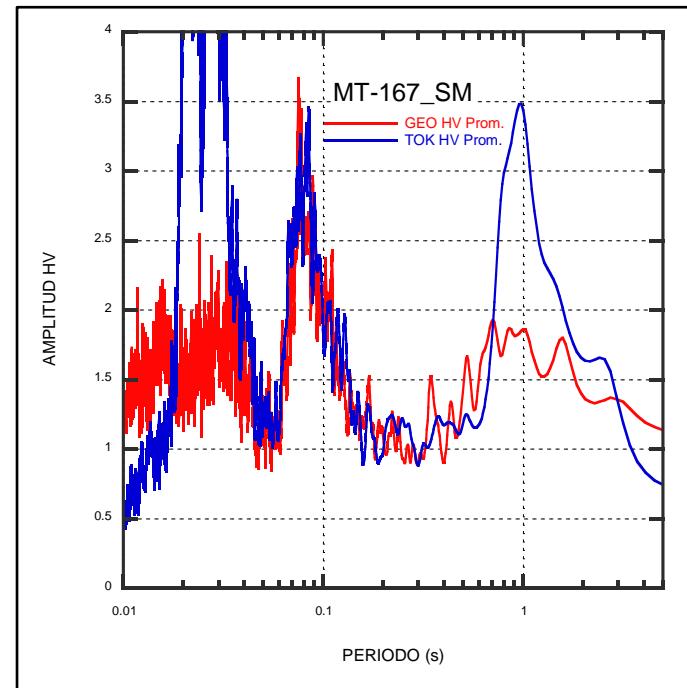
PERIODO T_0 : 0.69 s

PERIODO T_1 : 0.12 s

MT-166_SM (EJECUTADO)



MT-167_SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-166_SM

DISTRITO: San Miguel

PERIODO T_0 : 0.94 s

PERIODO T_1 : < 0.10 s

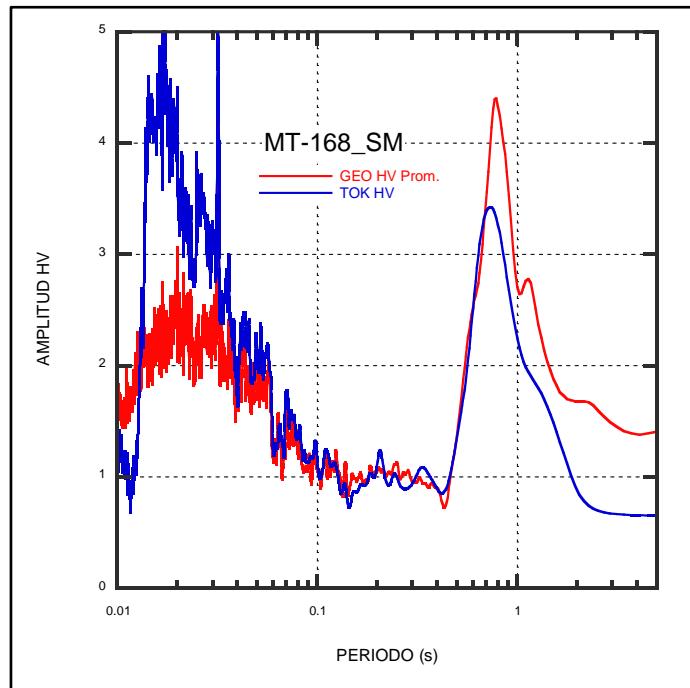
CÓDIGO: MT-167_SM

DISTRITO: San Miguel

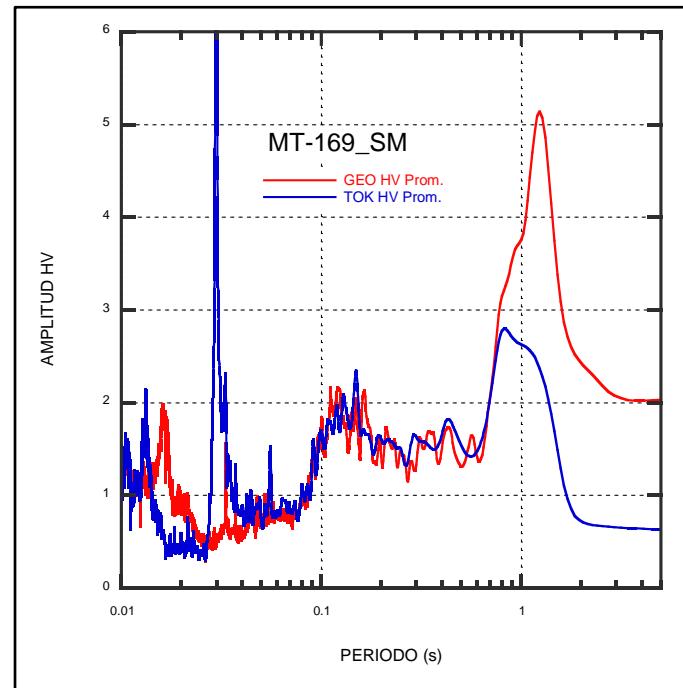
PERIODO T_0 : 0.97 s

PERIODO T_1 : < 0.10 s

MT-168_SM (EJECUTADO)



MT-169_SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-168_SM

DISTRITO: San Miguel

PERIODO T_0 : 0.80 s

PERIODO T_1 : -

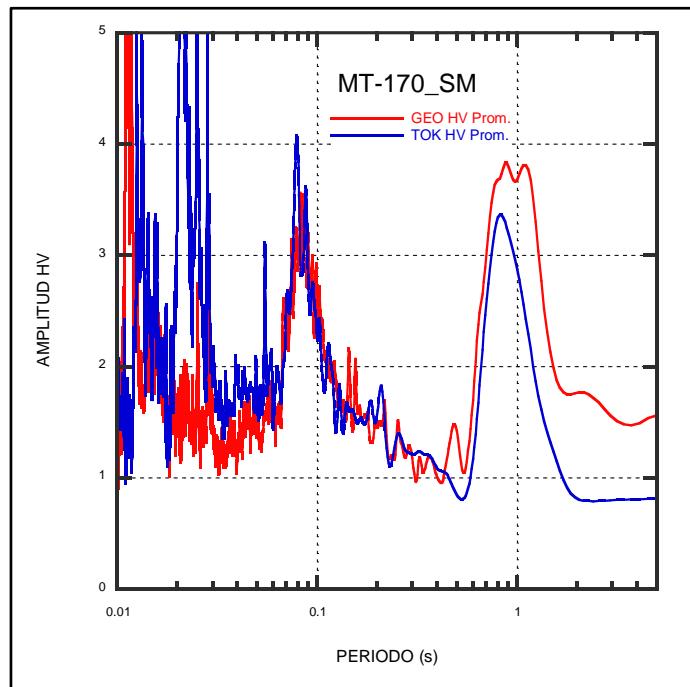
CÓDIGO: MT-169_SM

DISTRITO: San Miguel

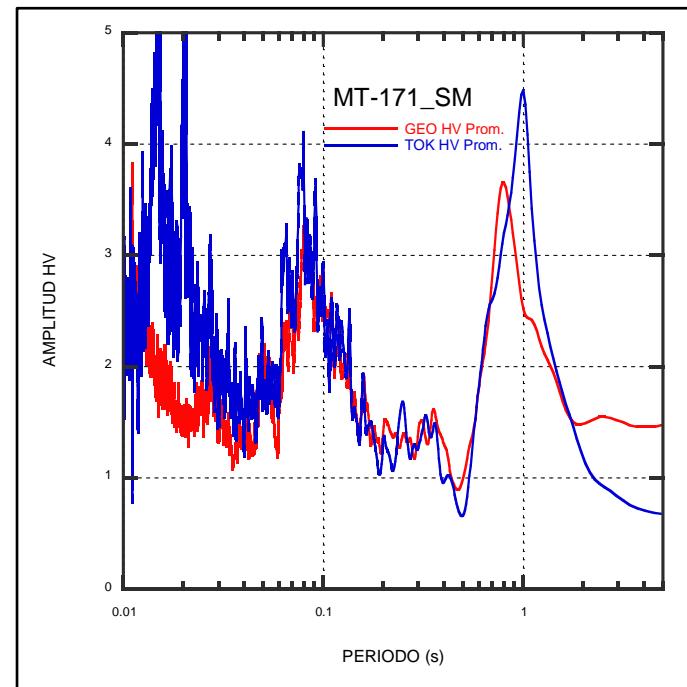
PERIODO T_0 : 0.83 s

PERIODO T_1 : 0.12 s

MT-170_SM (EJECUTADO)



MT-171_SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-170_SM

DISTRITO: San Miguel

PERIODO T₀: 0.84 s

PERIODO T₁: < 0.10 s

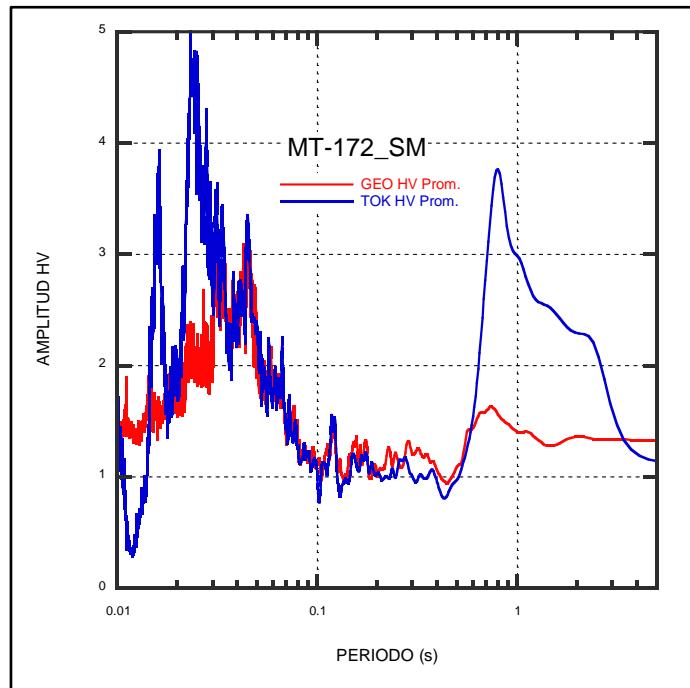
CÓDIGO: MT-171_SM

DISTRITO: San Miguel

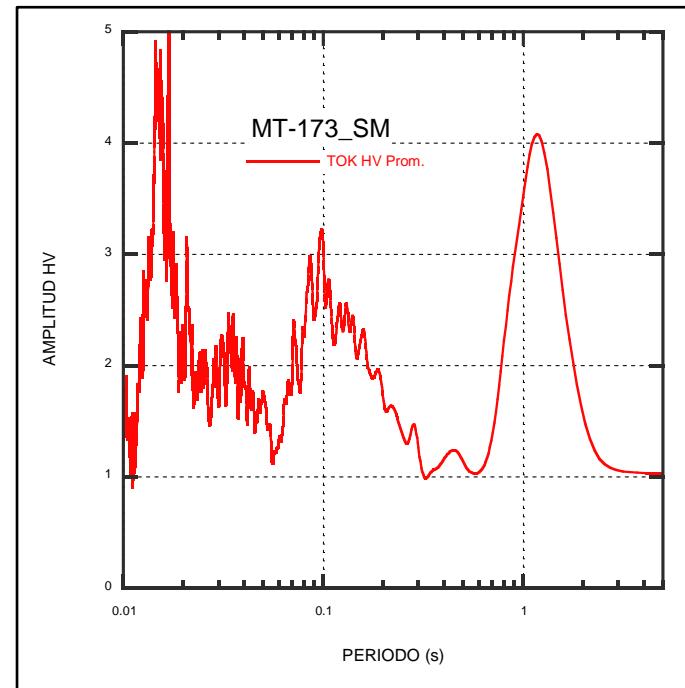
PERIODO T₀: 1.00 s

PERIODO T₁: < 0.10 s

MT-172_SM (EJECUTADO)



MT-173_SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-172_SM

DISTRITO: San Miguel

PERIODO T_0 : 0.77 s

PERIODO T_1 : -

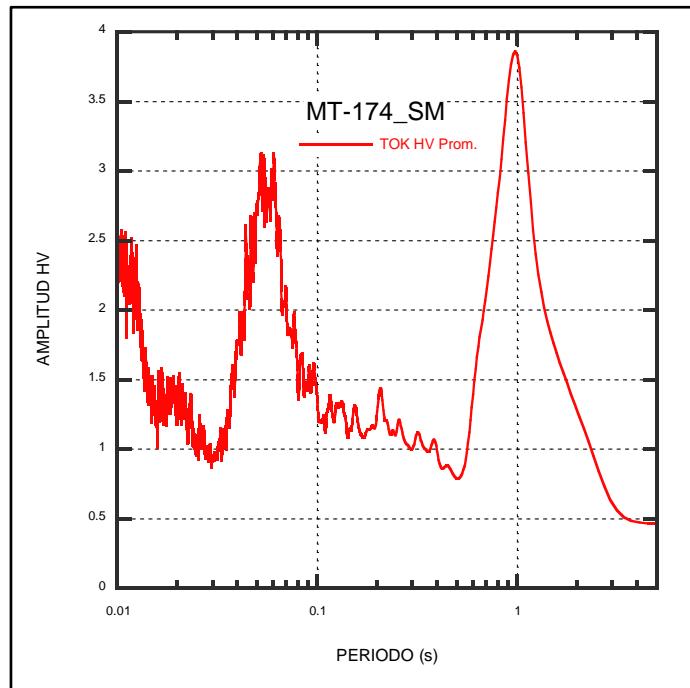
CÓDIGO: MT-173_SM

DISTRITO: San Miguel

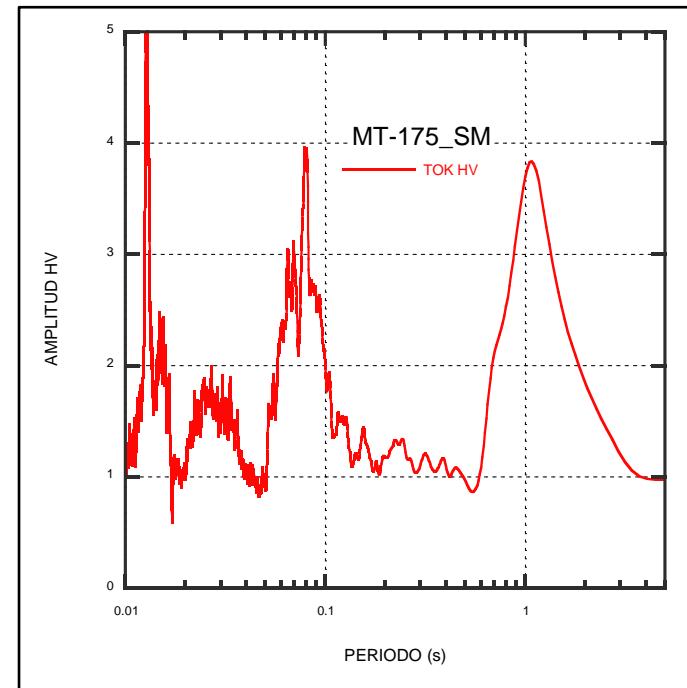
PERIODO T_0 : 1.20 s

PERIODO T_1 : 0.10 s

MT-174_SM (EJECUTADO)



MT-175_SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-174_SM

DISTRITO: San Miguel

PERIODO T_0 : 0.97 s

PERIODO T_1 : < 0.10 s

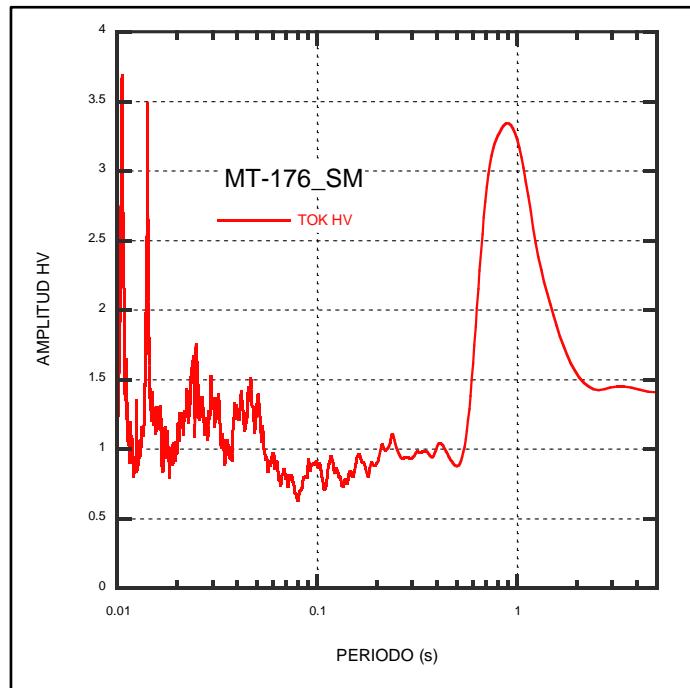
CÓDIGO: MT-175_SM

DISTRITO: San Miguel

PERIODO T_0 : 1.06 s

PERIODO T_1 : < 0.10 s

MT-176_SM (EJECUTADO)



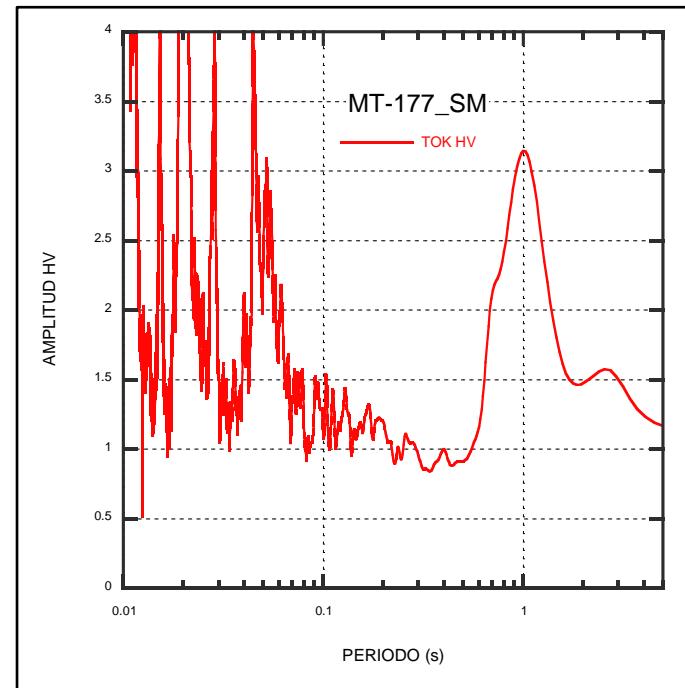
CÓDIGO: MT-176_SM

DISTRITO: San Miguel

PERIODO T_0 : 0.90 s

PERIODO T_1 : -

MT-177_SM (EJECUTADO)



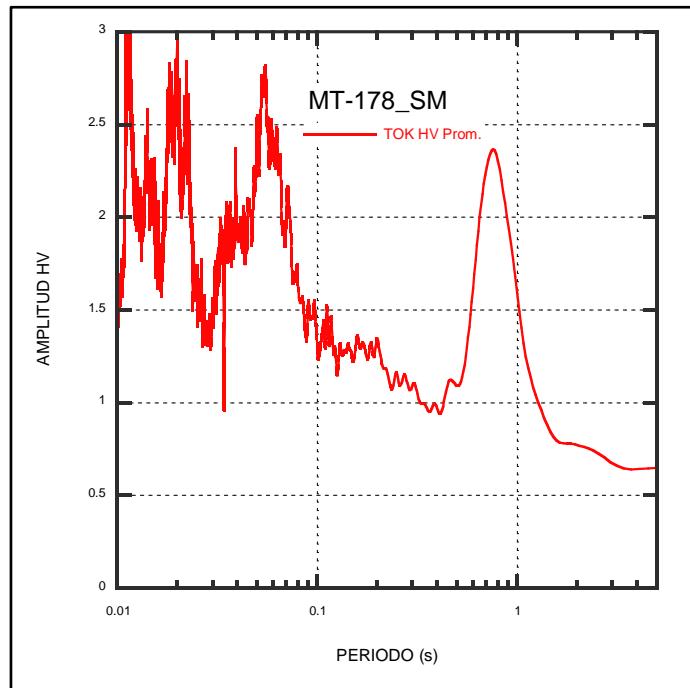
CÓDIGO: MT-177_SM

DISTRITO: San Miguel

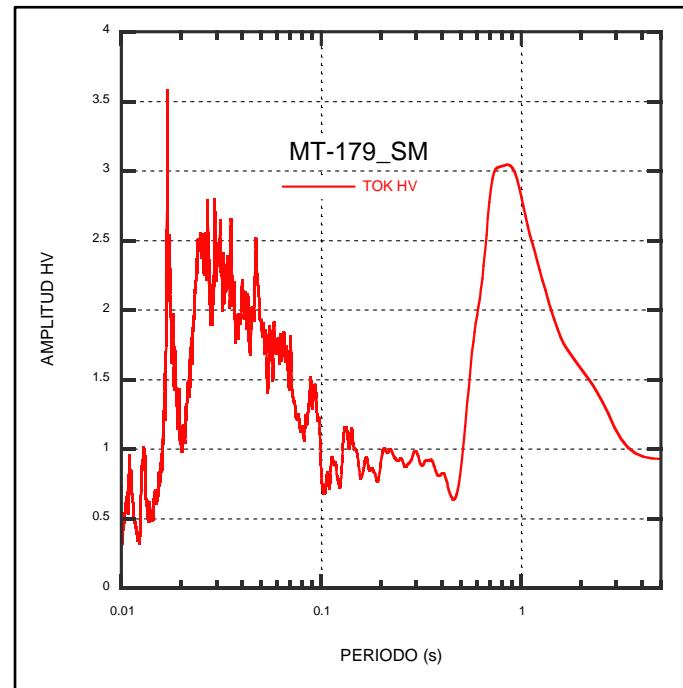
PERIODO T_0 : 1.00 s

PERIODO T_1 : < 0.10 s

MT-178_SM (EJECUTADO)



MT-179_SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-178_SM

DISTRITO: San Miguel

PERIODO T_0 : 0.76 s

PERIODO T_1 : < 0.10 s

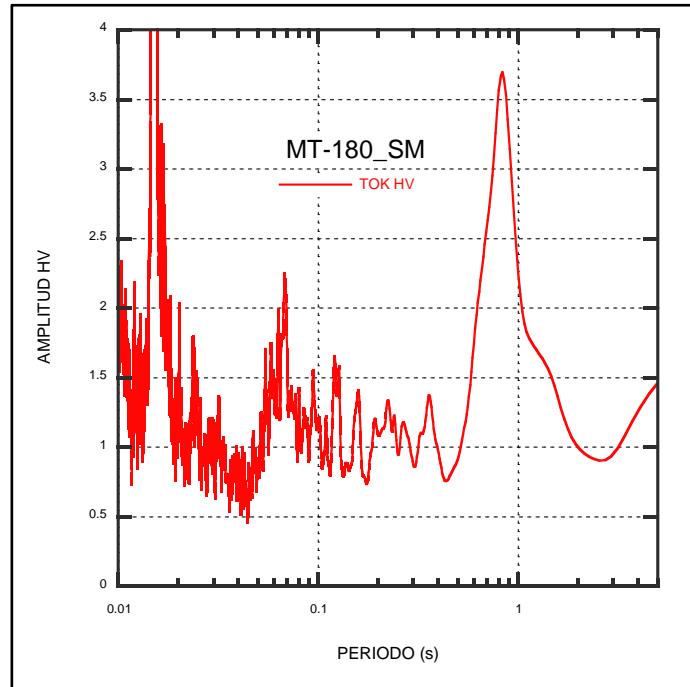
CÓDIGO: MT-179_SM

DISTRITO: San Miguel

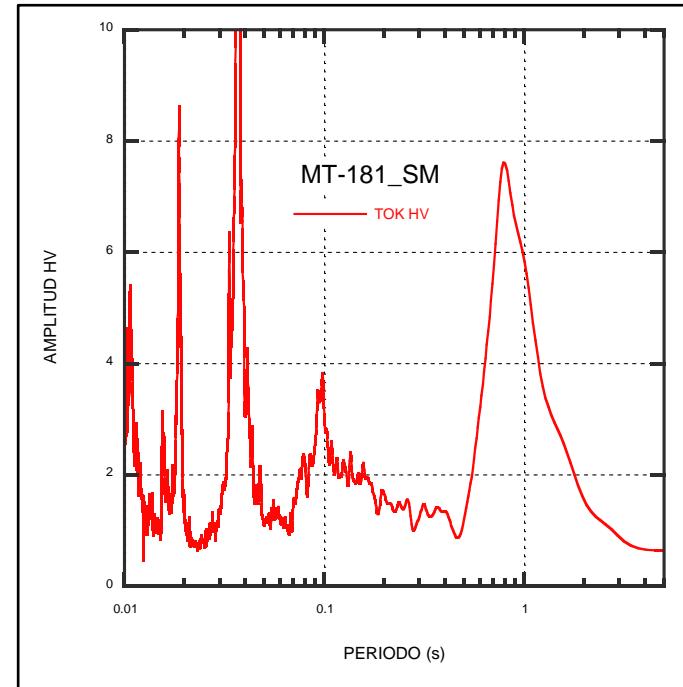
PERIODO T_0 : 0.84 s

PERIODO T_1 : -

MT-180_SM (EJECUTADO)



MT-181_SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MT-180_SM

DISTRITO: San Miguel

PERIODO T_0 : 0.83 s

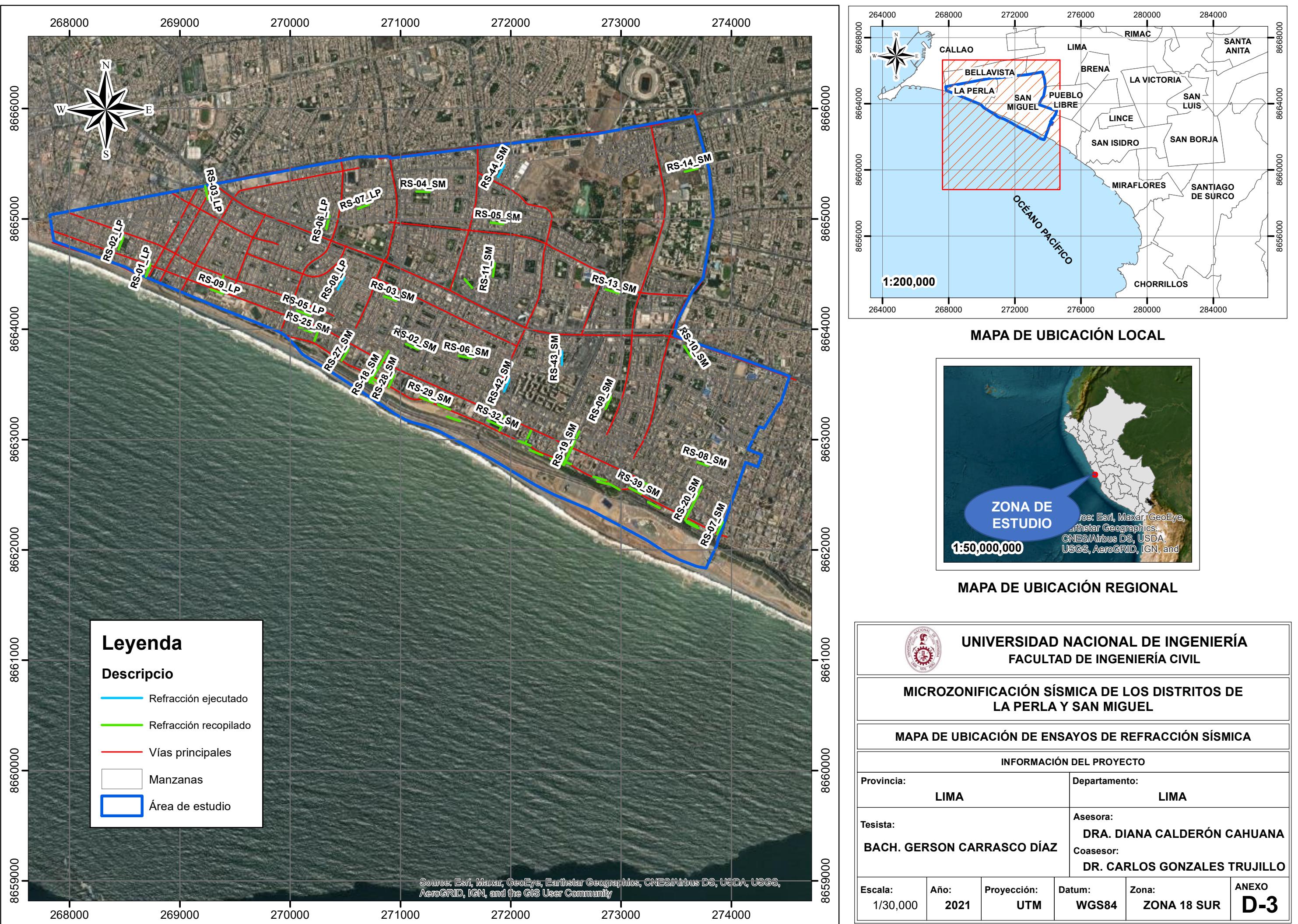
PERIODO T_1 : < 0.10 s

CÓDIGO: MT-181_SM

DISTRITO: San Miguel

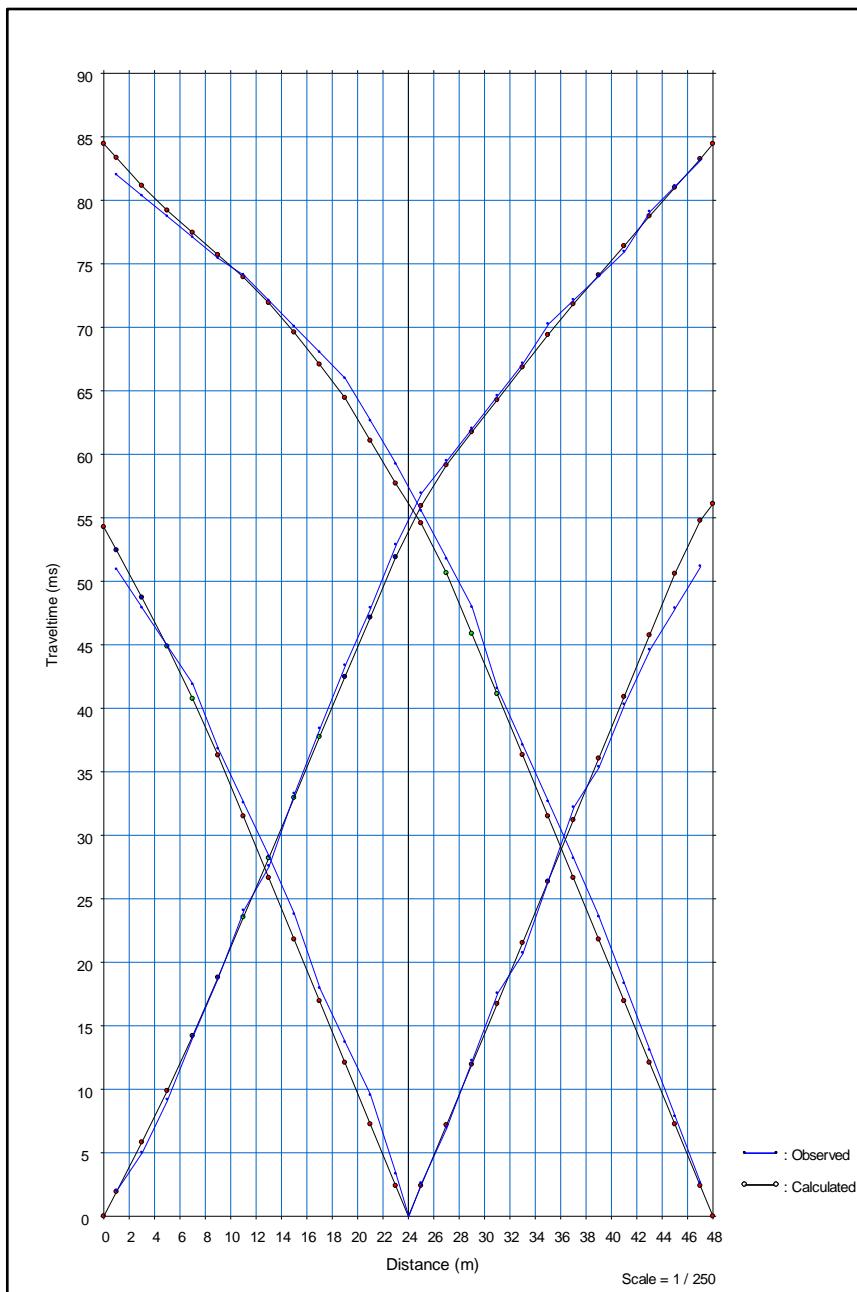
PERIODO T_0 : 0.80 s

PERIODO T_1 : 0.10 s



ANEXO D-4: DROMOCRÓNICAS

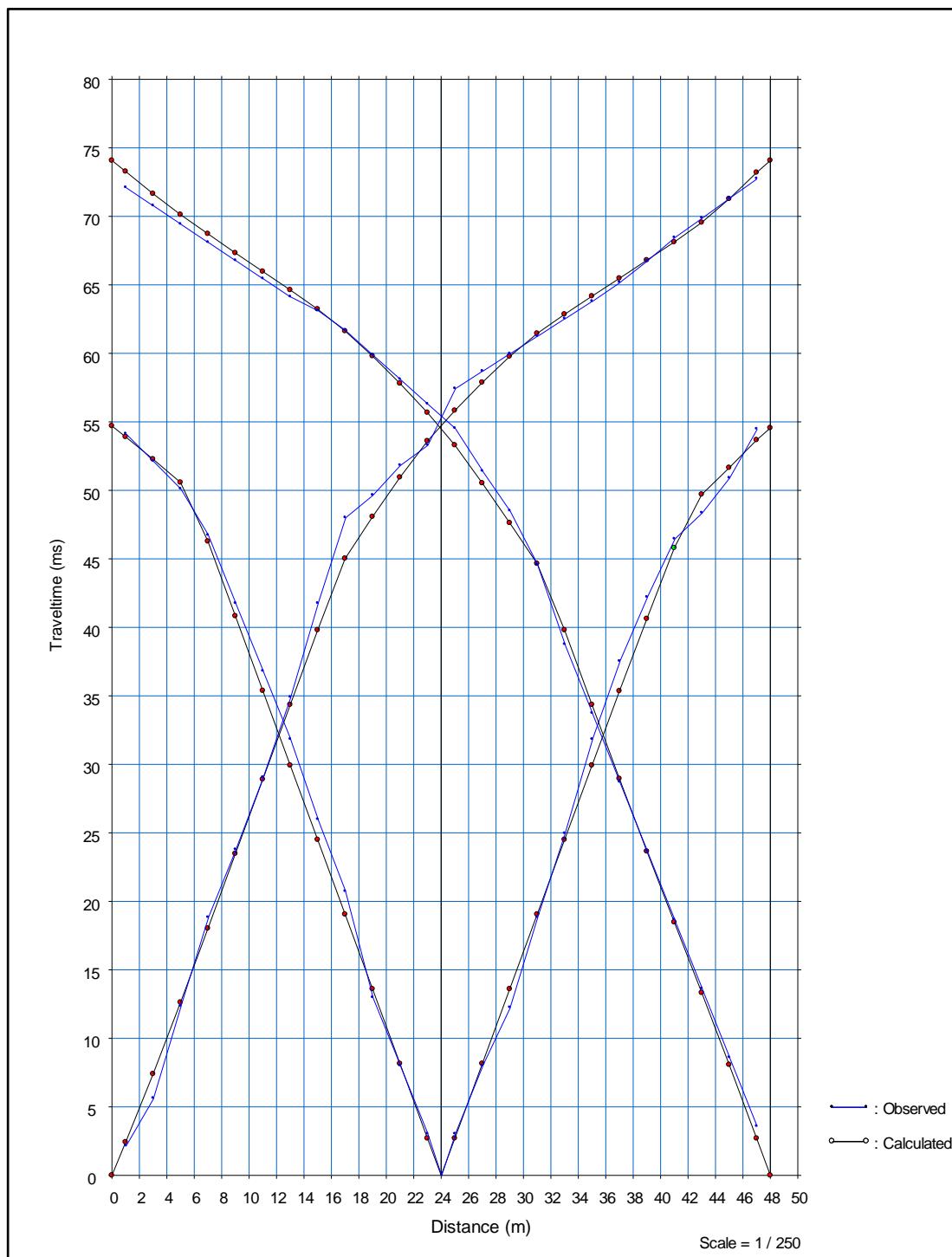
RS-08 LP (EJECUTADO)



DISTRITO: La Perla

LONGITUD DE LÍNEA: 48 m

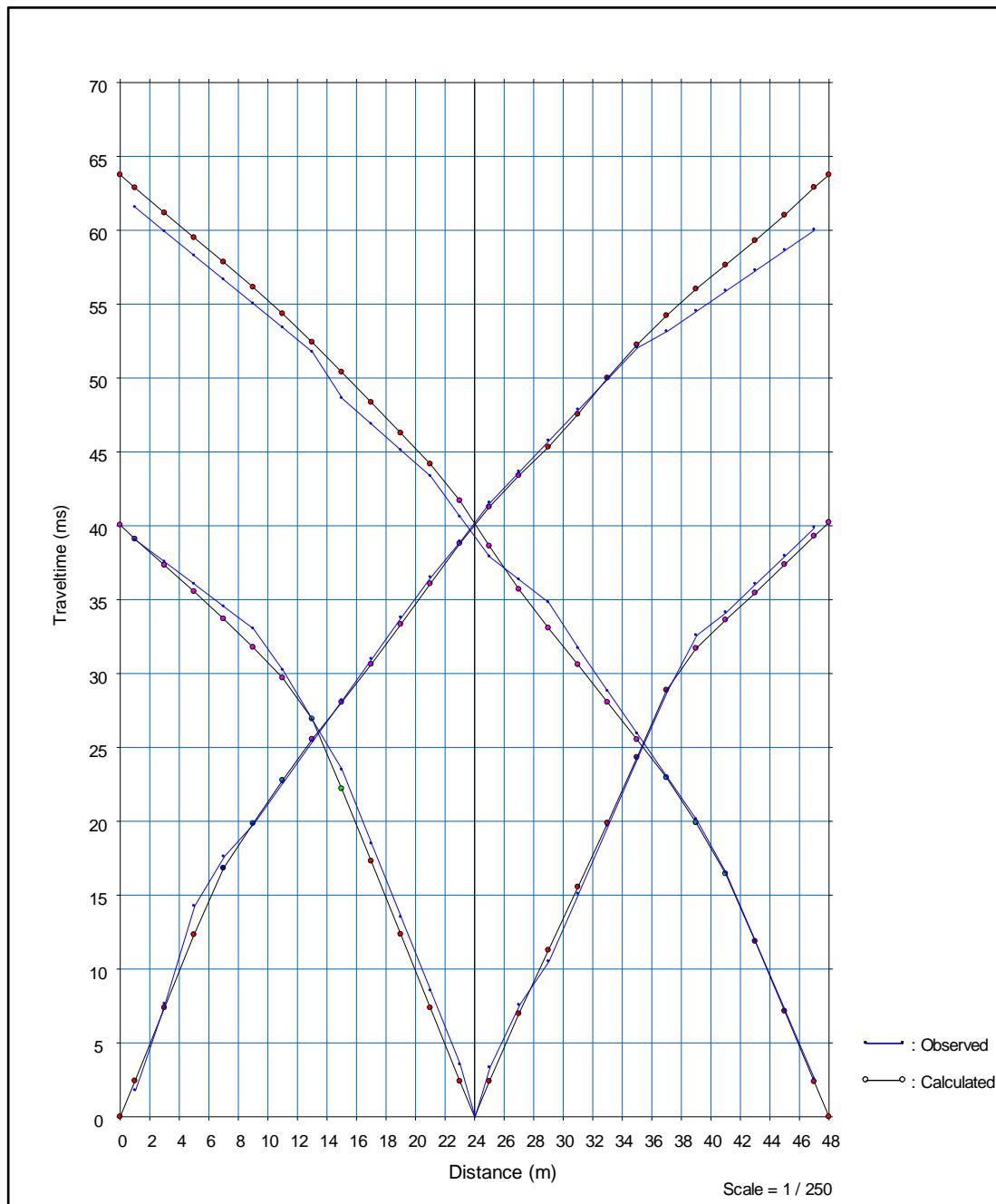
RS-42 SM (EJECUTADO)



DISTRITO: San Miguel

LONGITUD DE LÍNEA: 48 m

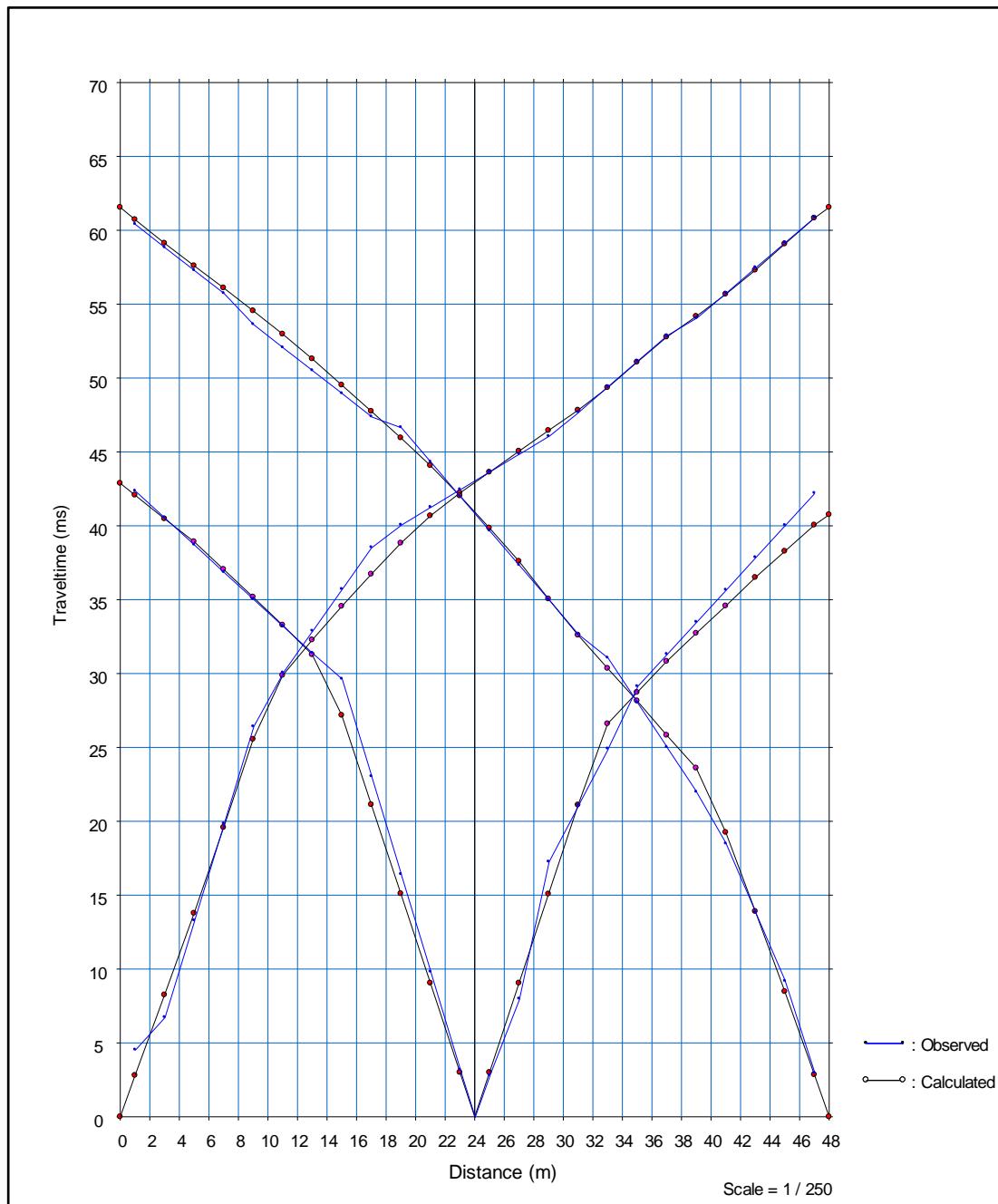
RS-43 SM (EJECUTADO)



DISTRITO: San Miguel

LONGITUD DE LÍNEA: 48 m

RS-44 SM (EJECUTADO)

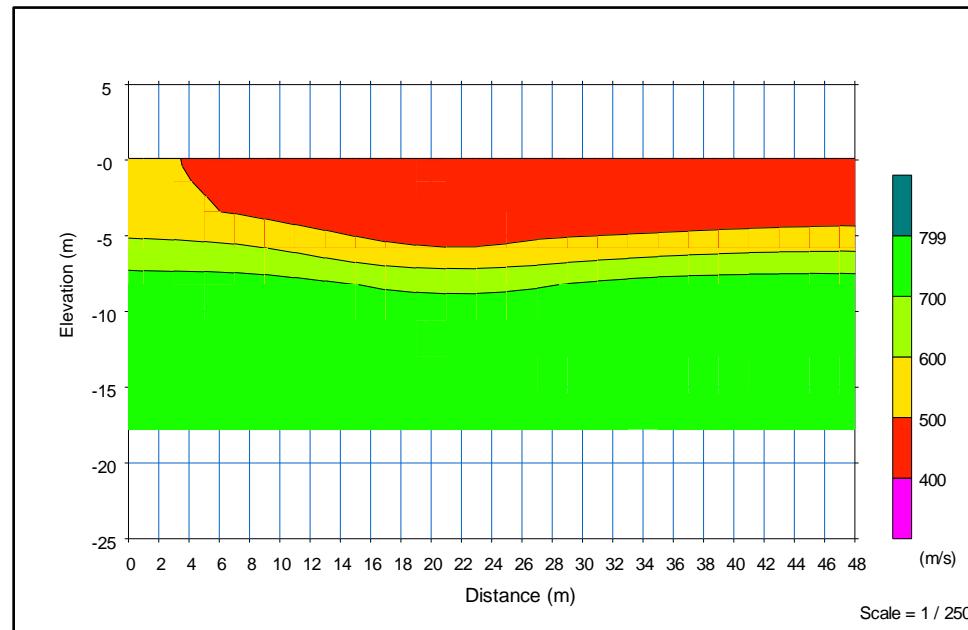


DISTRITO: San Miguel

LONGITUD DE LÍNEA: 48 m

ANEXO D-5: PERFILES VP REFRACCIÓN SÍSMICA

RS-08_LP (EJECUTADO)



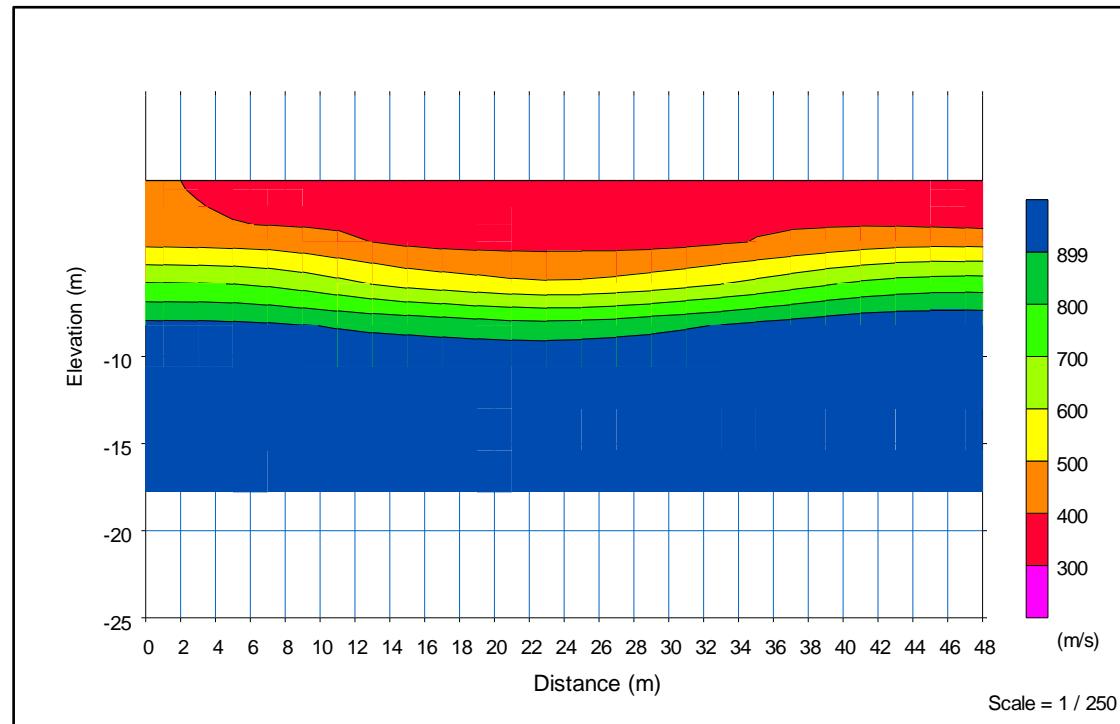
DISTRITO: La Perla

COORDENADAS UTM: **INICIO:** 270441.34 m E 8664401.01 m S

FIN: 270464.25 m E 8664440.90 m S

LONGITUD: 48 m **FECHA:** 01/06/2021

RS-42 SM (EJECUTADO)



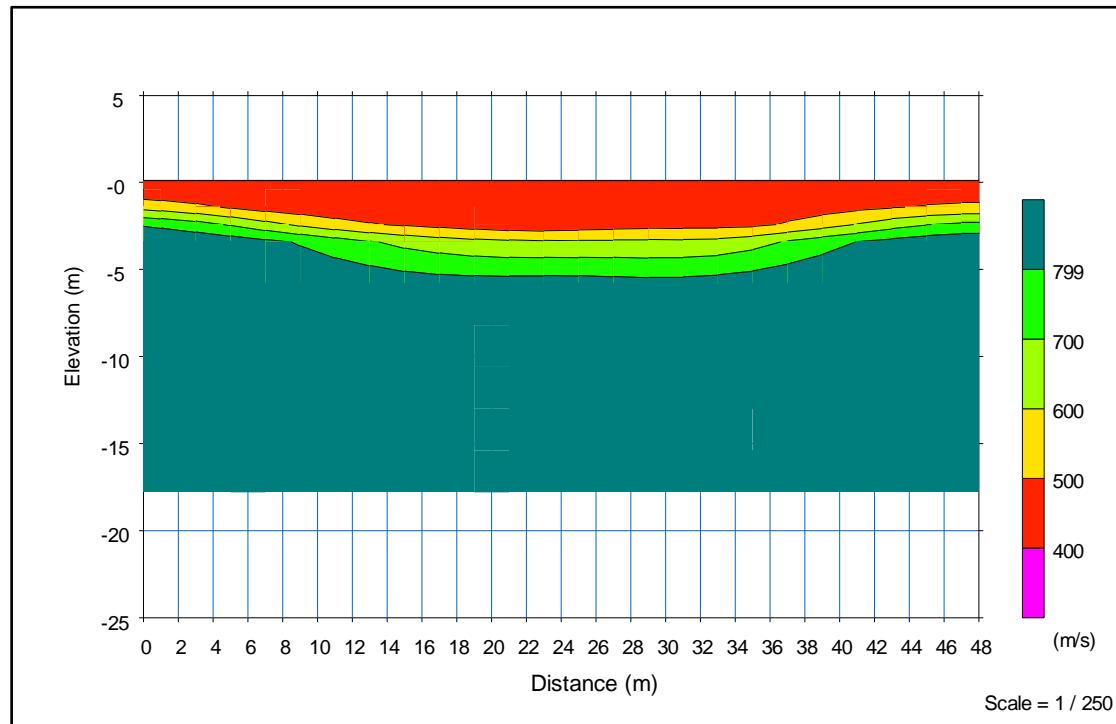
DISTRITO: San Miguel

COORDENADAS UTM: **INICIO:** 271986.18 m E 8663529.54 m S

FIN: 271967.53 m E 8663487.49 m S

LONGITUD: 48 m **FECHA:** 26/05/2021

RS-43 SM (EJECUTADO)



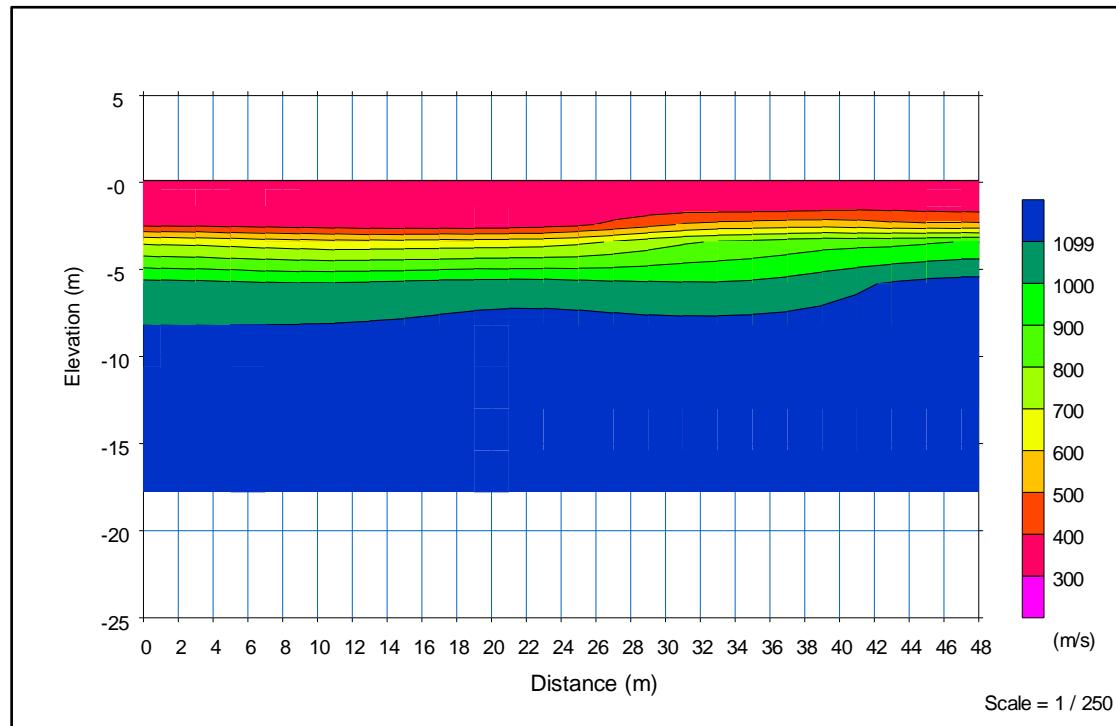
DISTRITO: San Miguel

COORDENADAS UTM: **INICIO:** 272473.84 m E 8663787.66 m S

FIN: 272472.83 m E 8663741.67 m S

LONGITUD: 48 m **FECHA:** 26/05/2021

RS-44 SM (EJECUTADO)

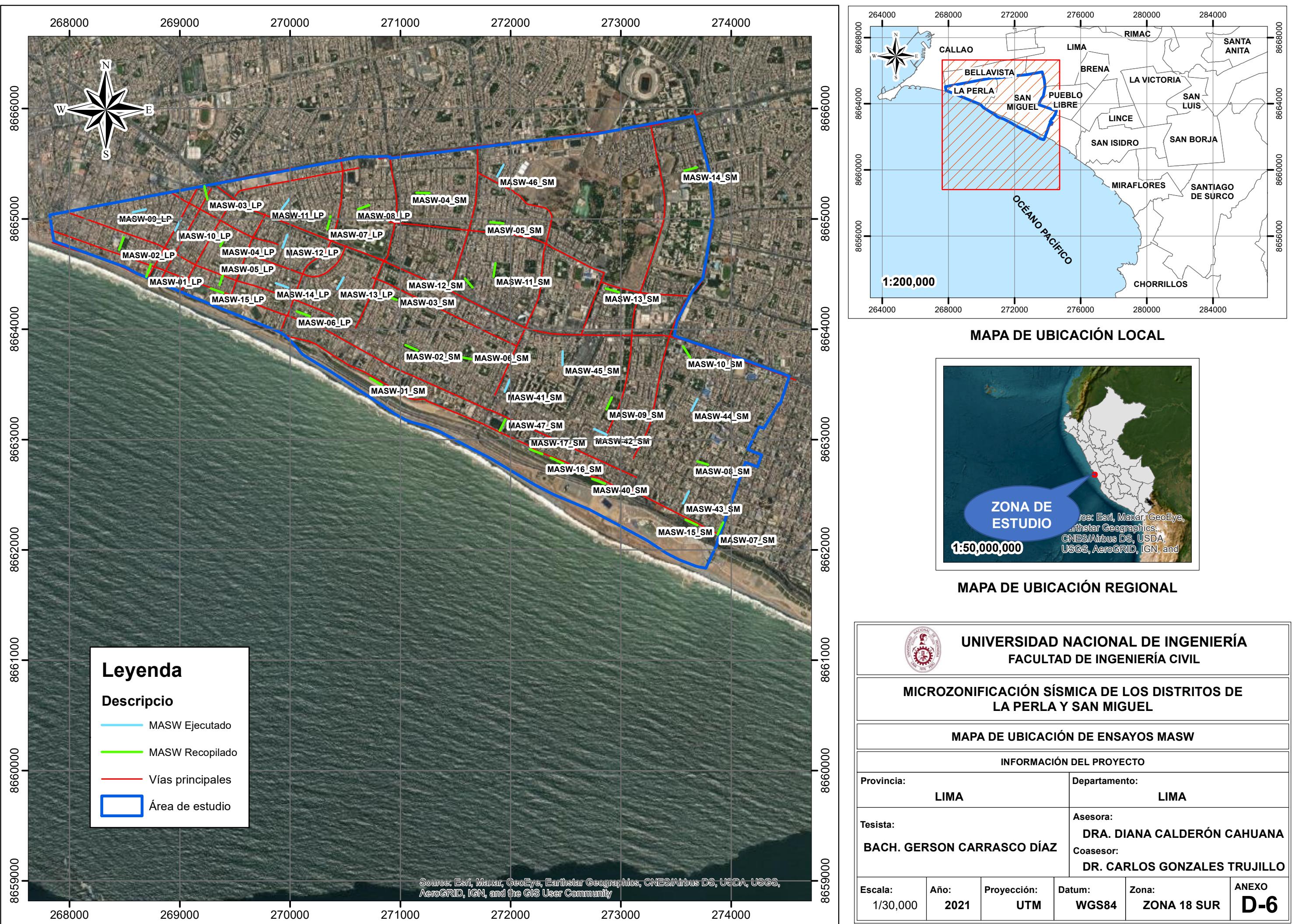


DISTRITO: San Miguel

COORDENADAS UTM: **INICIO:** 271910.58 m E 8665443.70 m S

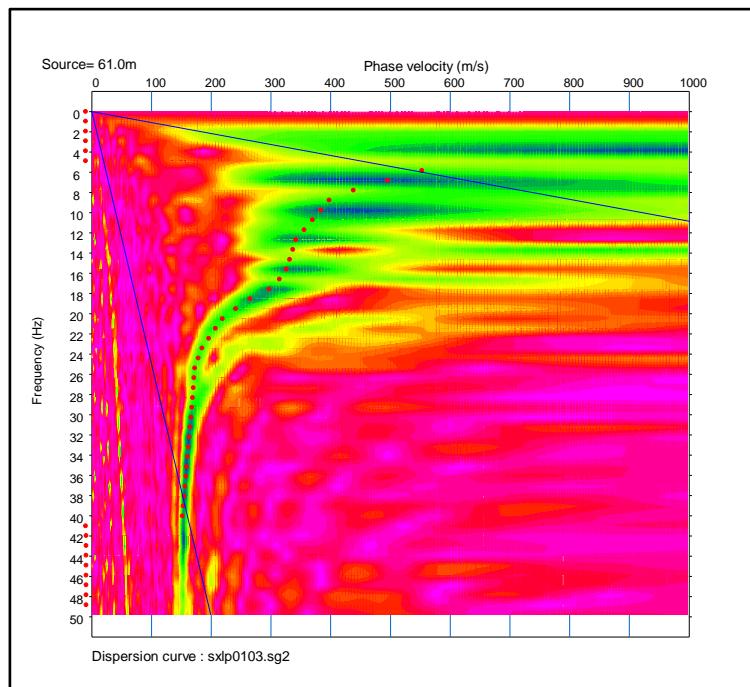
FIN: 271887.95 m E 8665403.65 m S

LONGITUD: 48 m **FECHA:** 26/05/2021

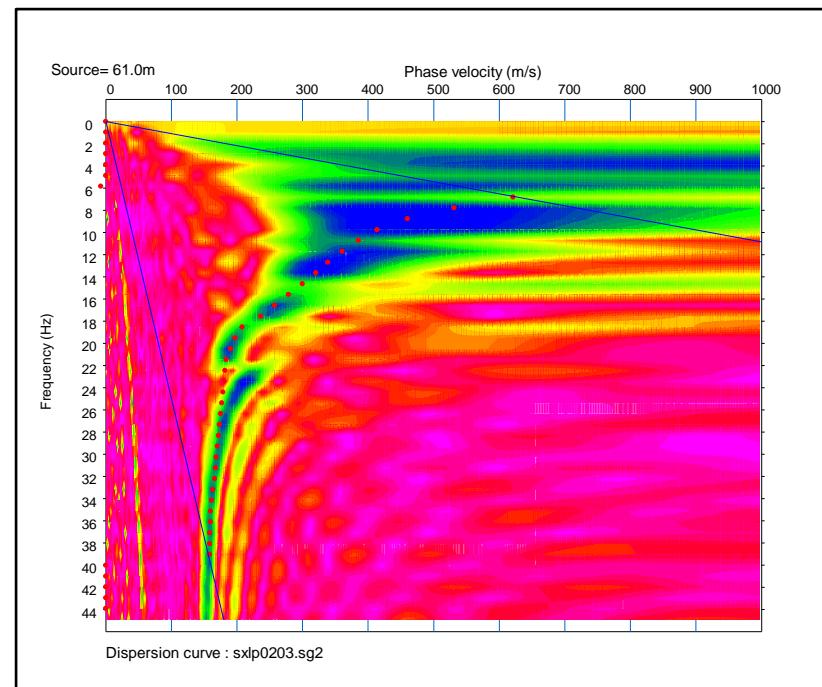


ANEXO D-7: CURVAS DE DISPERSIÓN MASW

MASW-09 LP (EJECUTADO)



MASW-10 LP (EJECUTADO)



CÓDIGO: MASW-09_LP

DISTRITO: La Perla

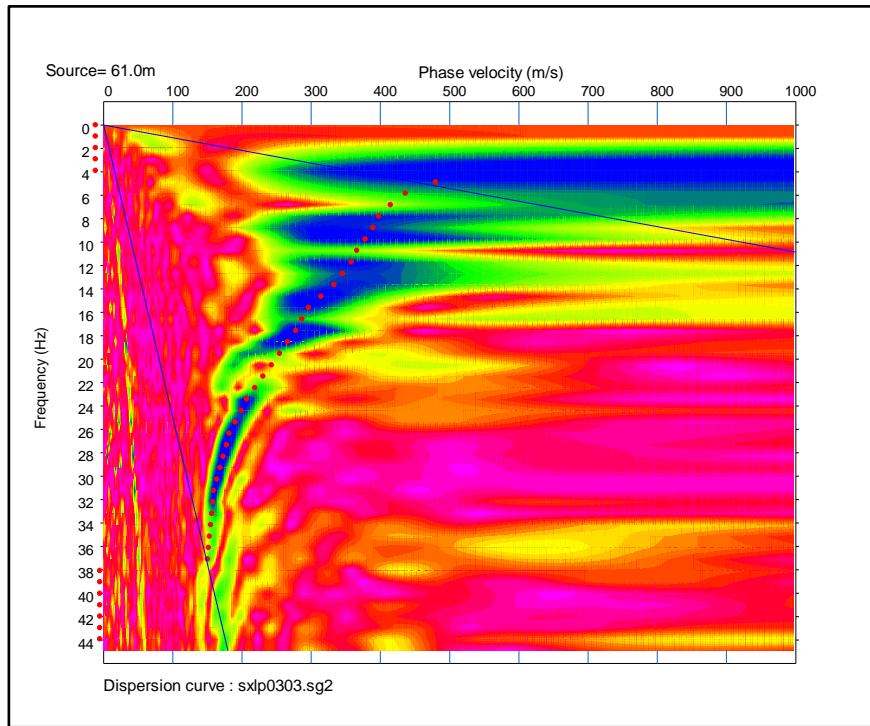
V_s30 PROMEDIO: 381 m/s

CÓDIGO: MASW-10_LP

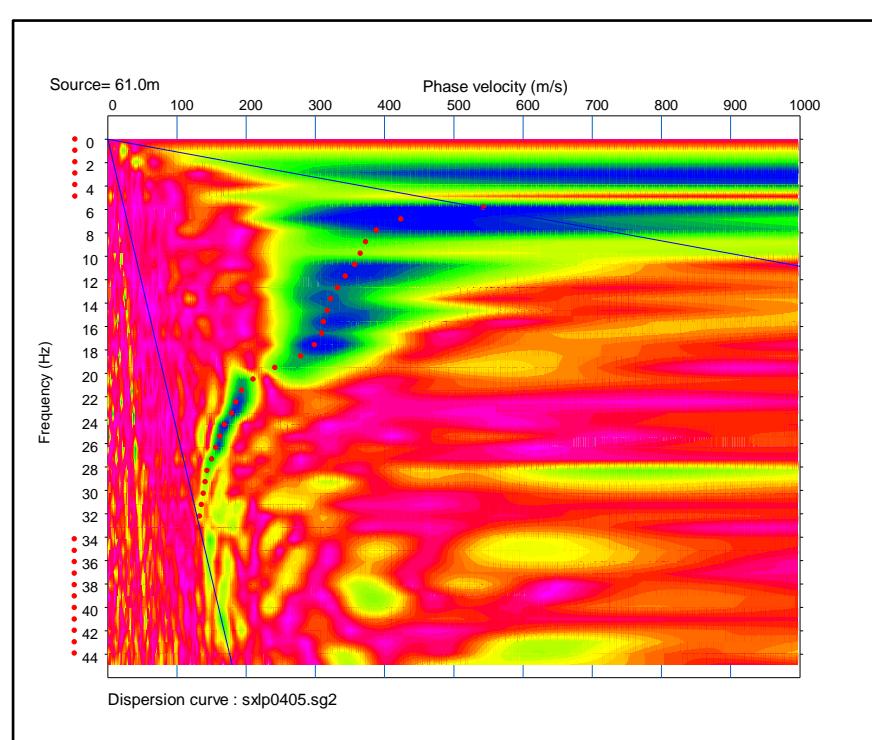
DISTRITO: La Perla

V_s30 PROMEDIO: 372 m/s

MASW-11_LP (EJECUTADO)



MASW-12_LP (EJECUTADO)



CÓDIGO: MASW-11_LP

DISTRITO: La Perla

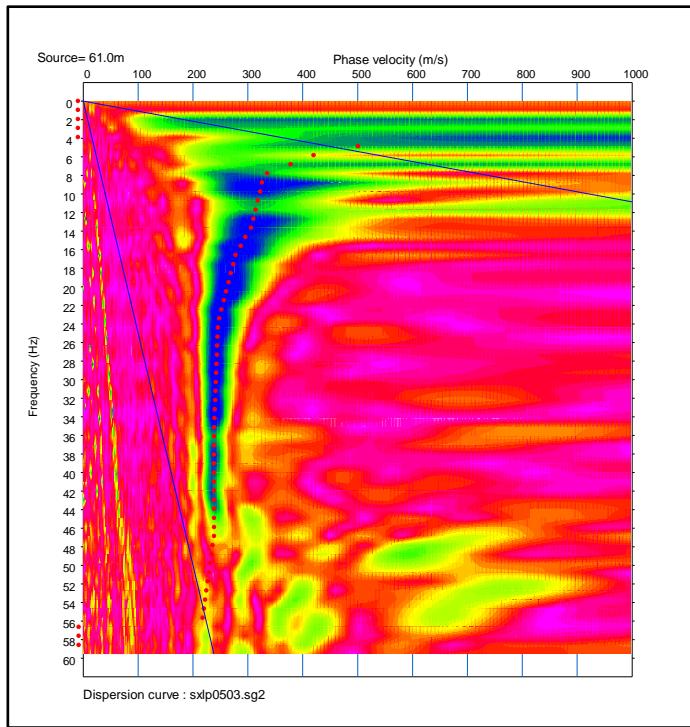
V_s30 PROMEDIO: 350 m/s

CÓDIGO: MASW-12_LP

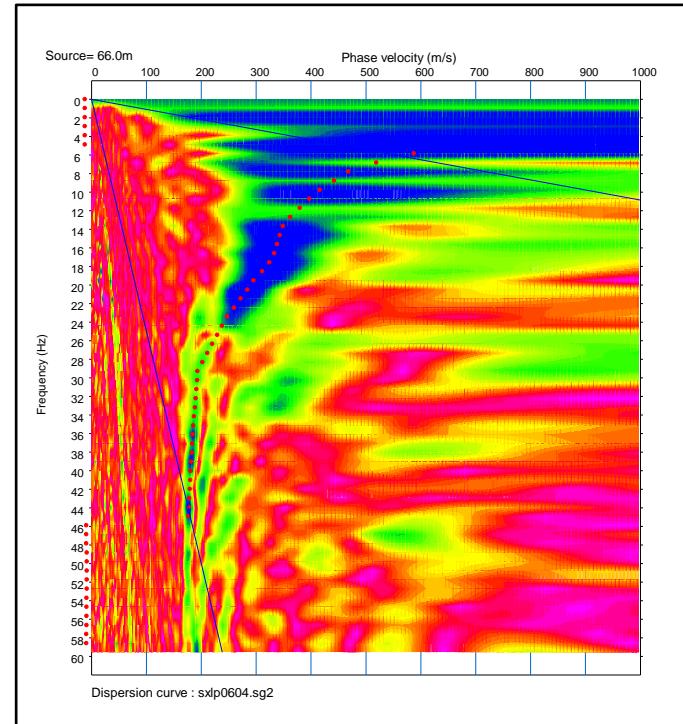
DISTRITO: La Perla

V_s30 PROMEDIO: 335 m/s

MASW-13_LP (EJECUTADO)



MASW-14_LP (EJECUTADO)



CÓDIGO: MASW-13_LP

DISTRITO: La Perla

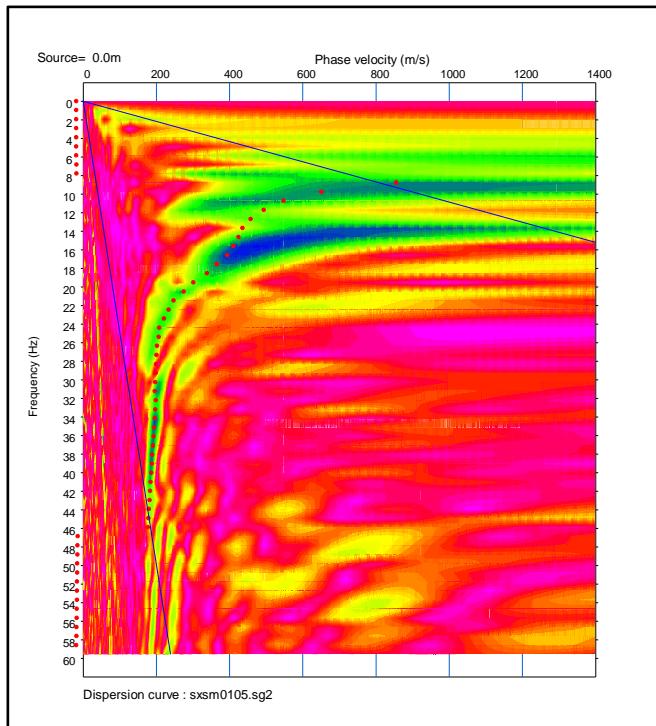
Vs30 PROMEDIO: 362 m/s

CÓDIGO: MASW-14_LP

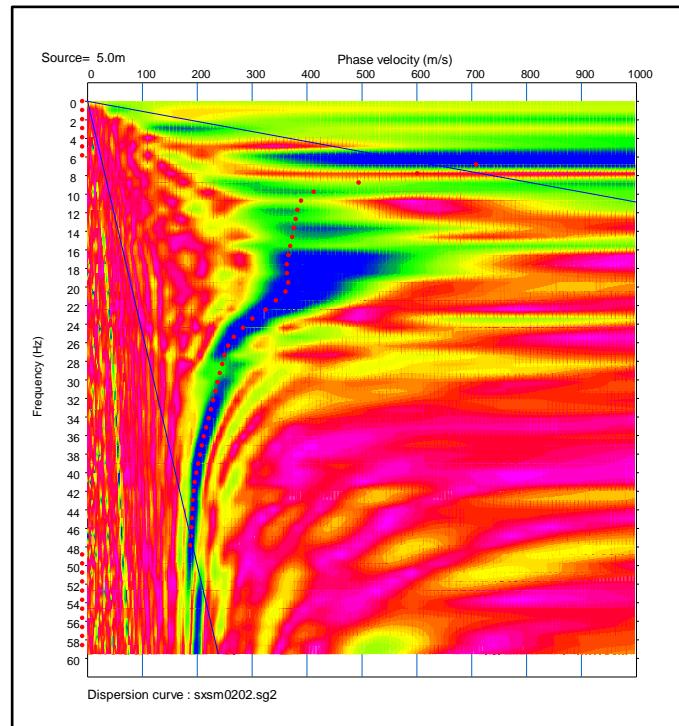
DISTRITO: La Perla

Vs30 PROMEDIO: 386 m/s

MASW-41 SM (EJECUTADO)



MASW-42 SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MASW-41_SM

DISTRITO: San Miguel

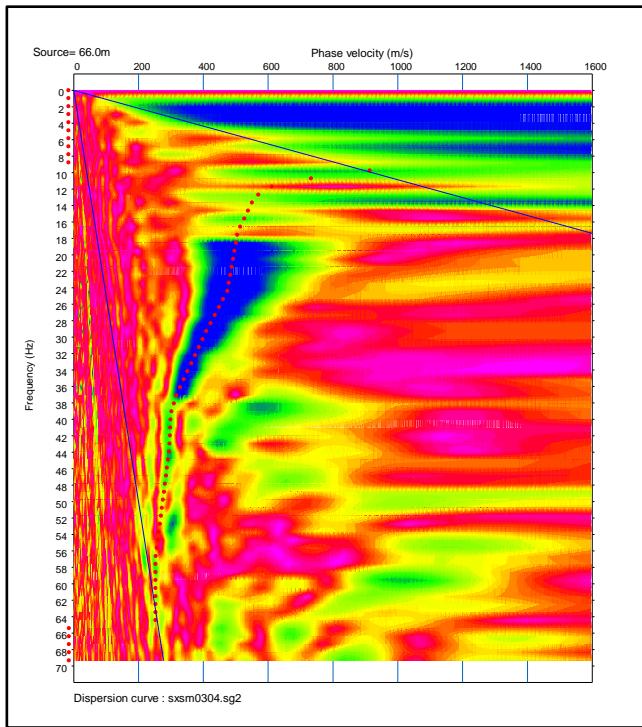
Vs30 PROMEDIO: 472 m/s

CÓDIGO: MASW-42_SM

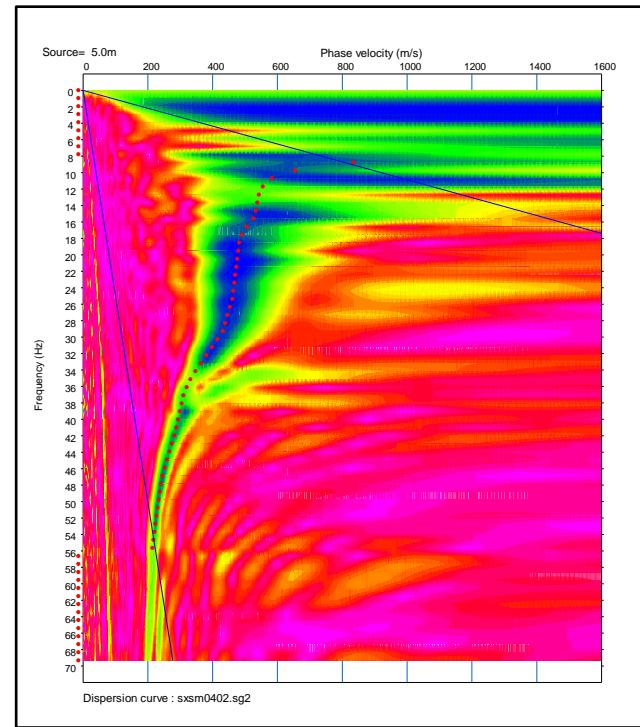
DISTRITO: San Miguel

Vs30 PROMEDIO: 447 m/s

MASW-43 SM (EJECUTADO)



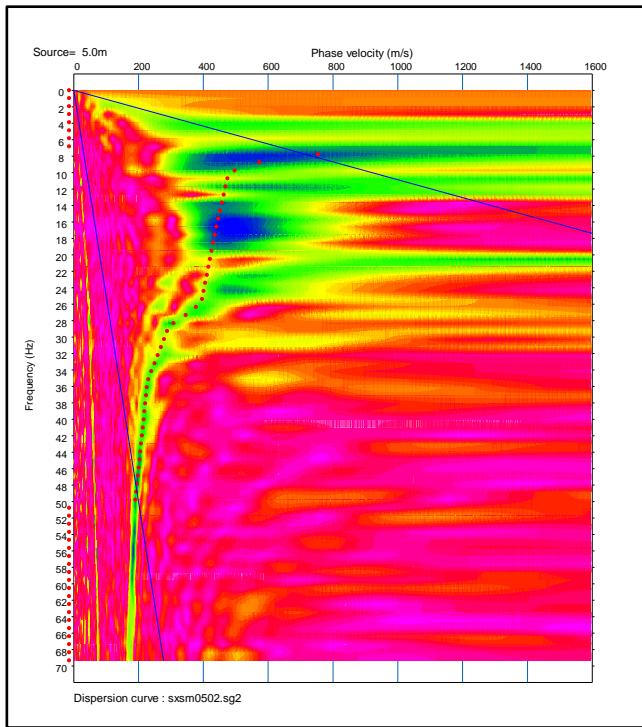
MASW-44 SM (EJECUTADO)



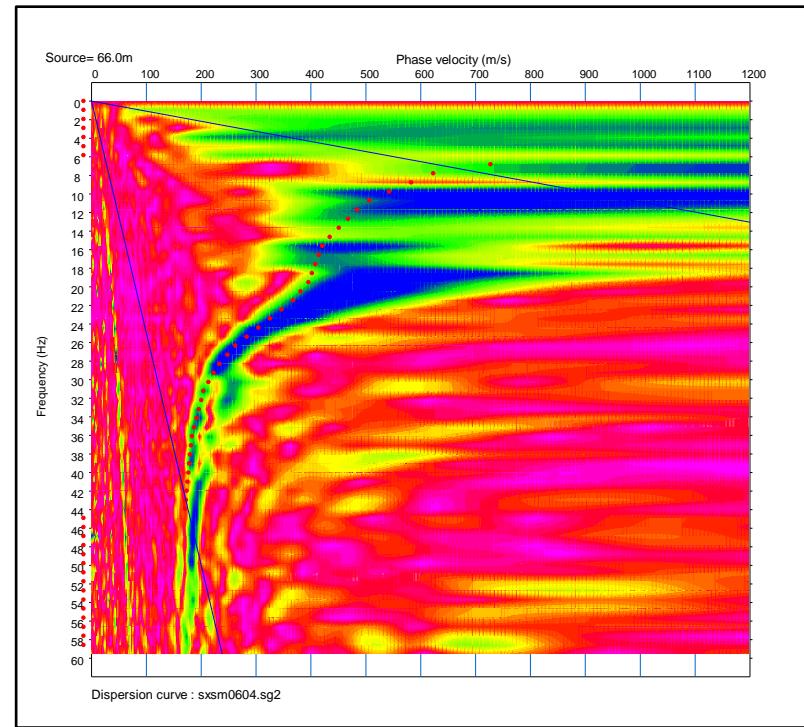
CÓDIGO: MASW-43_SM
DISTRITO: San Miguel
Vs30 PROMEDIO: 559 m/s

CÓDIGO: MASW-44_SM
DISTRITO: San Miguel
Vs30 PROMEDIO: 538 m/s

MASW-45 SM (EJECUTADO)



MASW-46 SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MASW-45_SM

DISTRITO: San Miguel

Vs30 PROMEDIO: 442 m/s

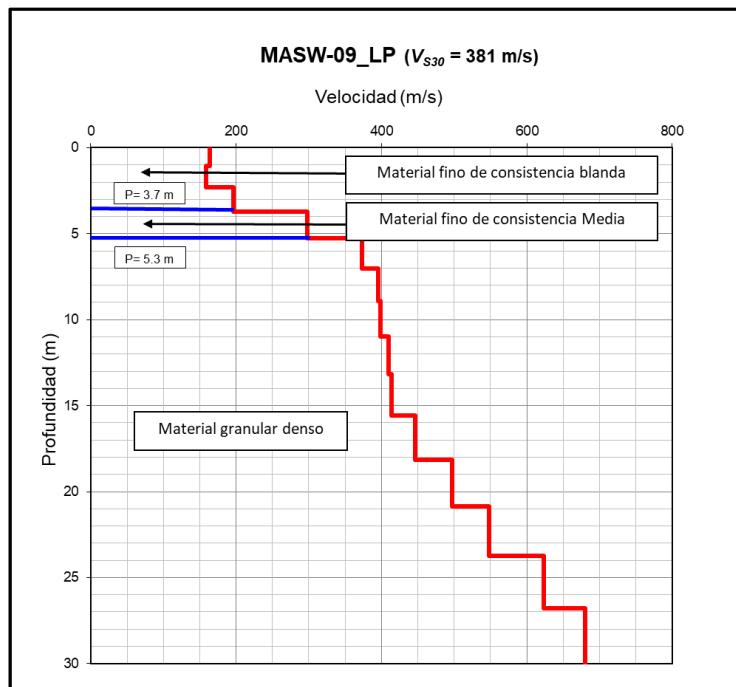
CÓDIGO: MASW-46_SM

DISTRITO: San Miguel

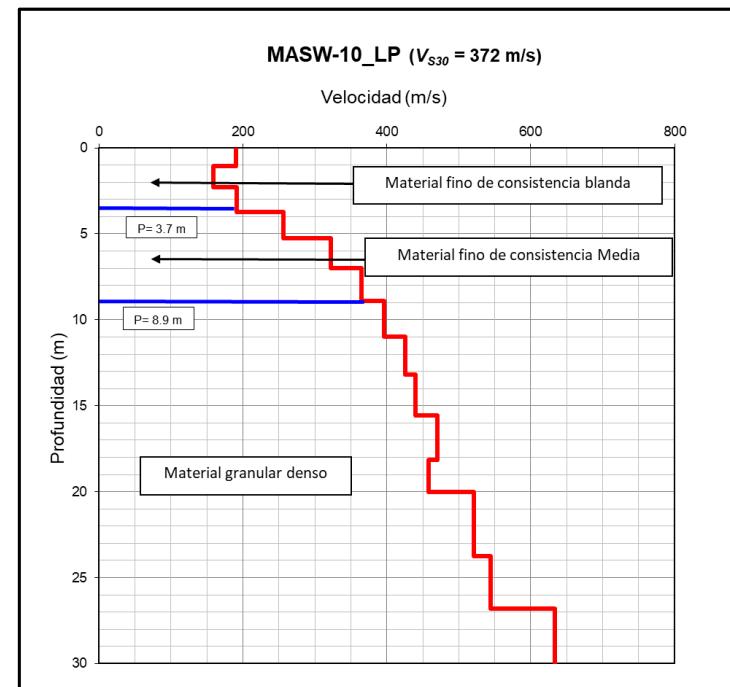
Vs30 PROMEDIO: 424 m/s

ANEXO D-8: PERFILES VS MASW

MASW-09_LP (EJECUTADO)



MASW-10_LP (EJECUTADO)



CÓDIGO: MASW-09_LP

DISTRITO: La Perla

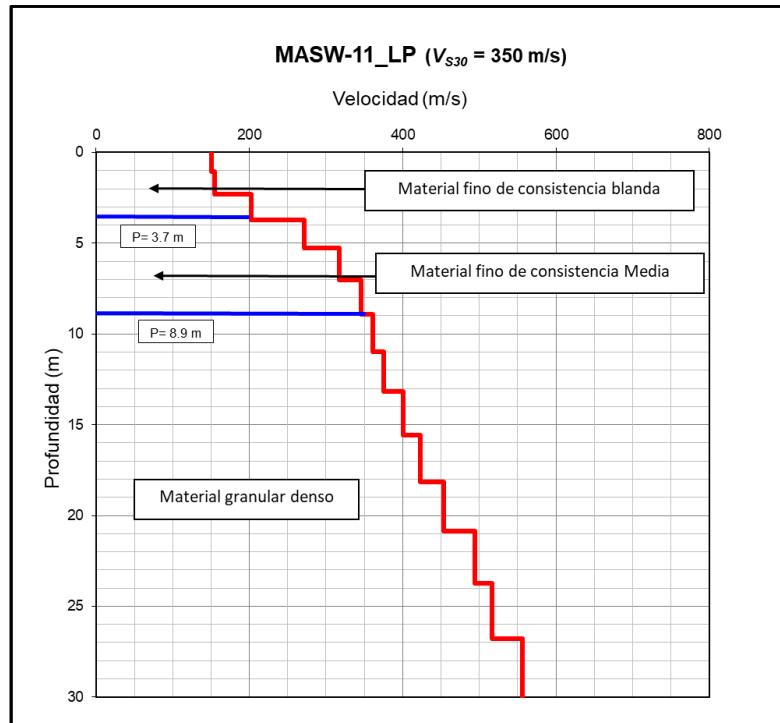
V_{s30} PROMEDIO: 381 m/s

CÓDIGO: MASW-10_LP

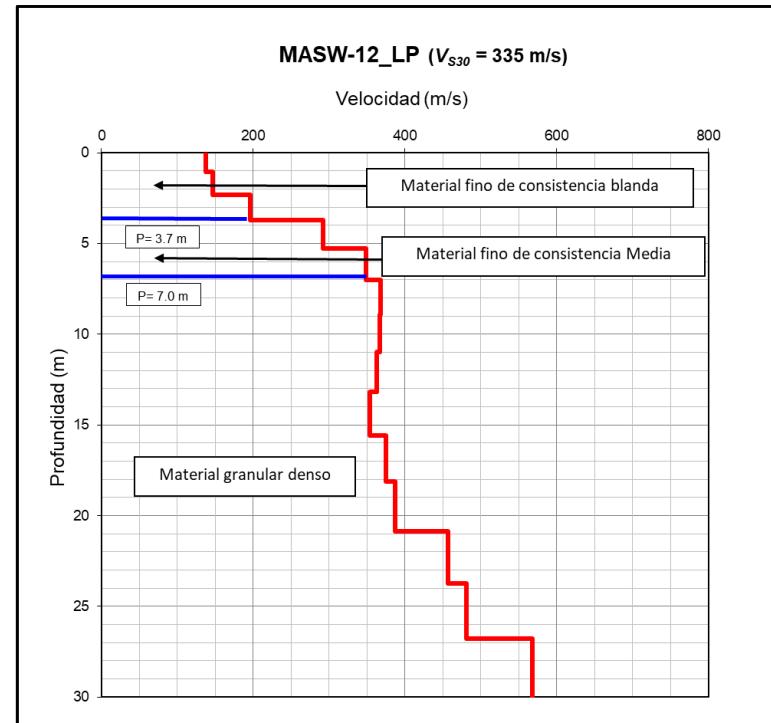
DISTRITO: La Perla

V_{s30} PROMEDIO: 372 m/s

MASW-11_LP (EJECUTADO)



MASW-12_LP (EJECUTADO)



CÓDIGO: MASW-11_LP

DISTRITO: La Perla

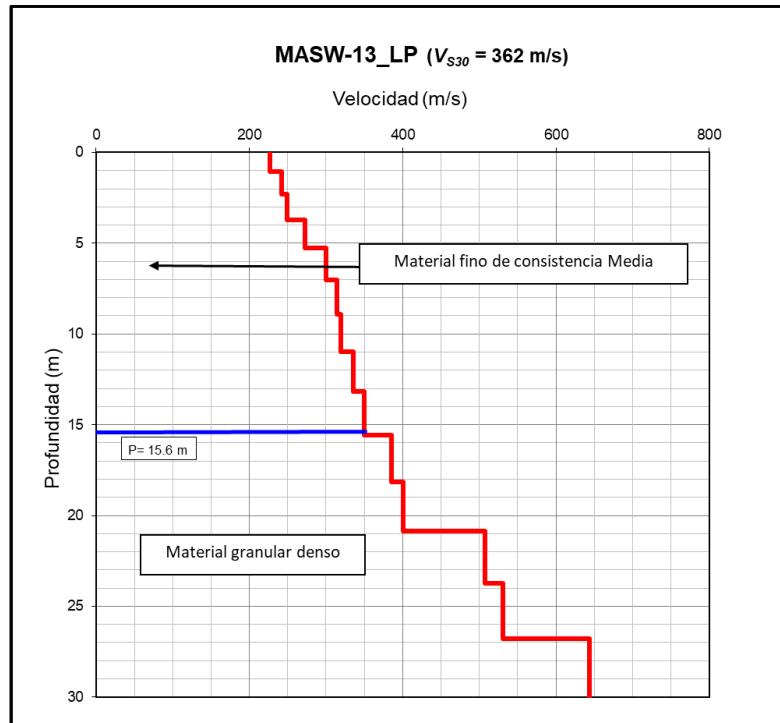
V_{s30} PROMEDIO: 350 m/s

CÓDIGO: MASW-12_LP

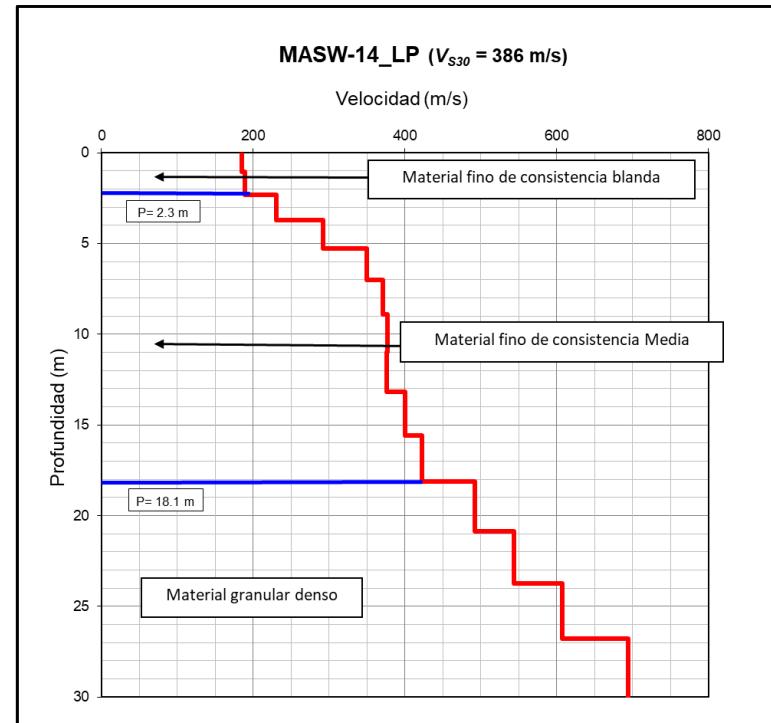
DISTRITO: La Perla

V_{s30} PROMEDIO: 335 m/s

MASW-13_LP (EJECUTADO)



MASW-14_LP (EJECUTADO)



CÓDIGO: MASW-13_LP

DISTRITO: La Perla

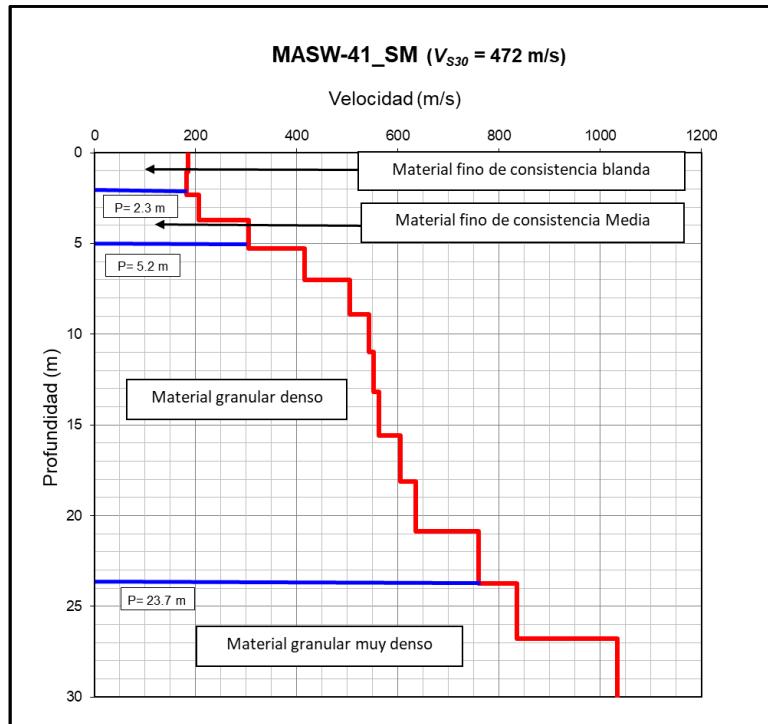
V_{s30} PROMEDIO: 362 m/s

CÓDIGO: MASW-14_LP

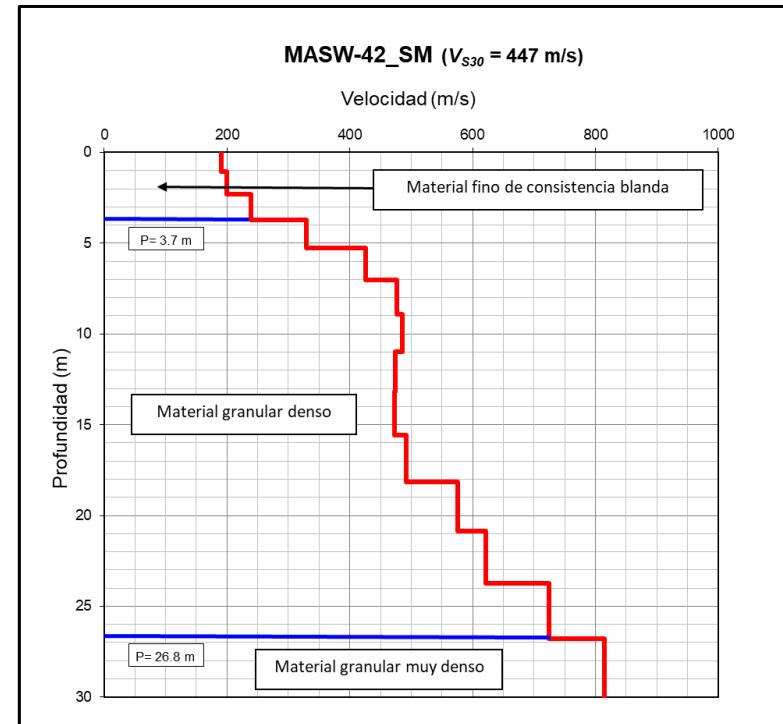
DISTRITO: La Perla

V_{s30} PROMEDIO: 386 m/s

MASW-41_SM (EJECUTADO)



MASW-42_SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MASW-41_SM

DISTRITO: San Miguel

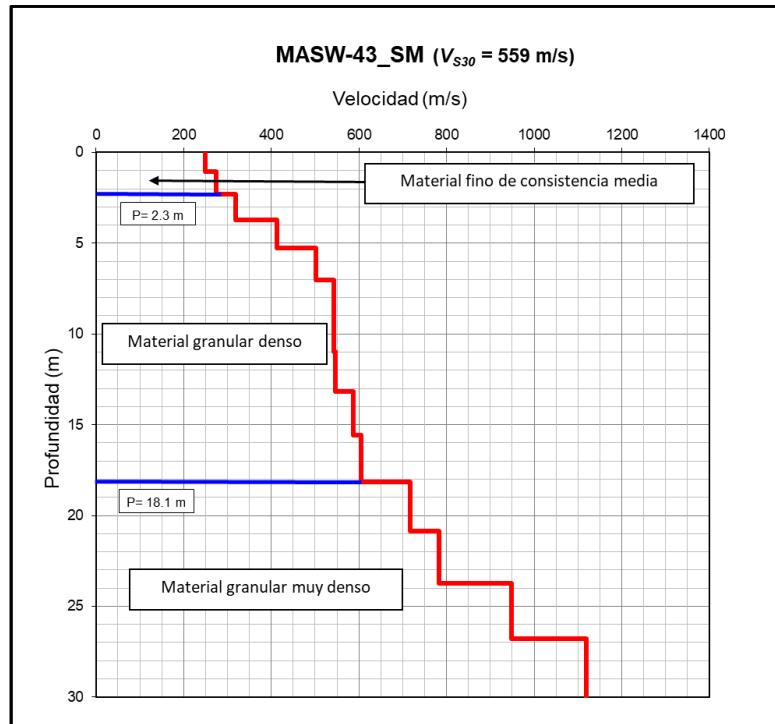
V_{s30} PROMEDIO: 472 m/s

CÓDIGO: MASW-42_SM

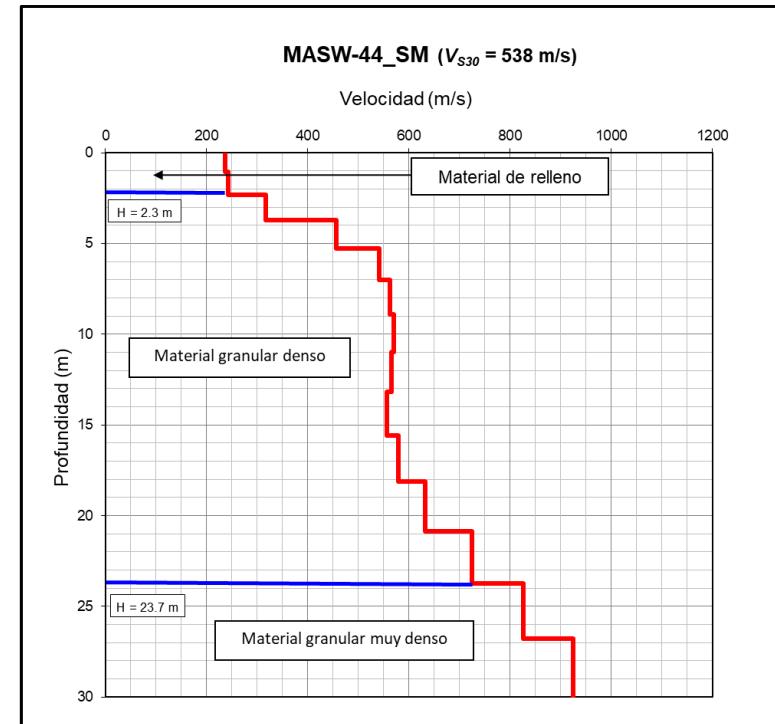
DISTRITO: San Miguel

V_{s30} PROMEDIO: 447 m/s

MASW-43_SM (EJECUTADO)



MASW-44_SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MASW-43_SM

DISTRITO: San Miguel

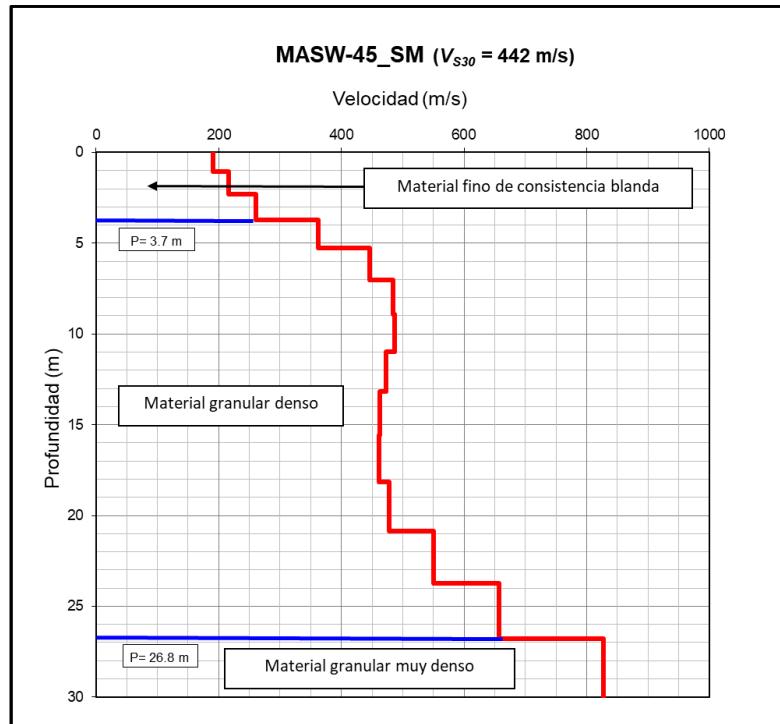
V_{s30} PROMEDIO: 559 m/s

CÓDIGO: MASW-44_SM

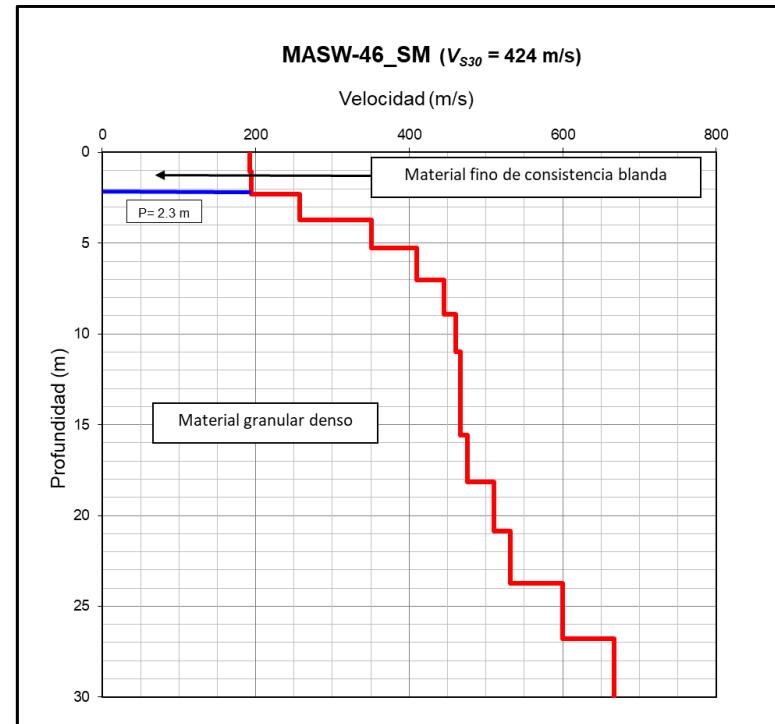
DISTRITO: San Miguel

V_{s30} PROMEDIO: 538 m/s

MASW-45_SM (EJECUTADO)



MASW-46_SM (EJECUTADO)



CÓDIGO: MASW-45_SM

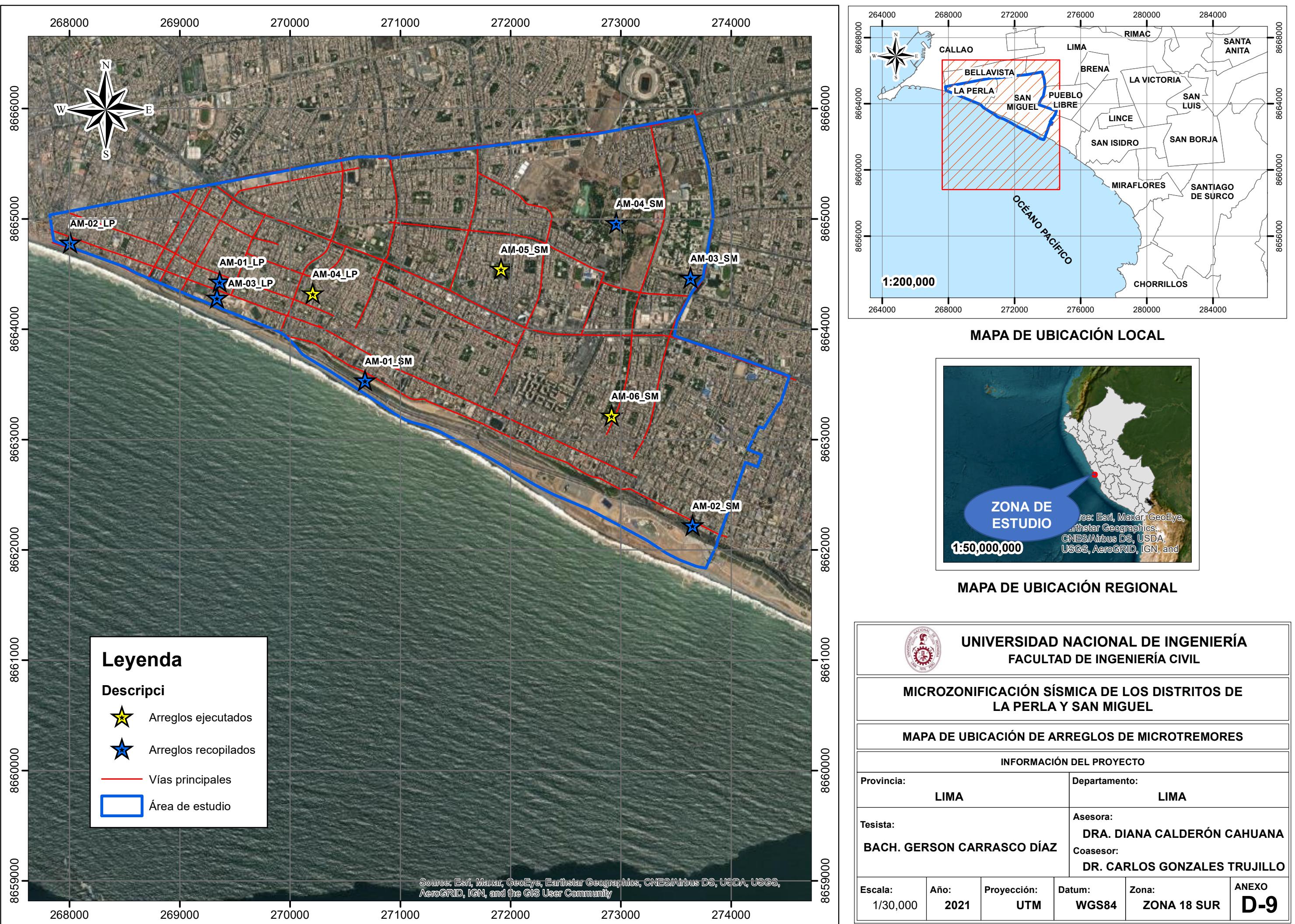
DISTRITO: San Miguel

V_{s30} PROMEDIO: 442 m/s

CÓDIGO: MASW-46_SM

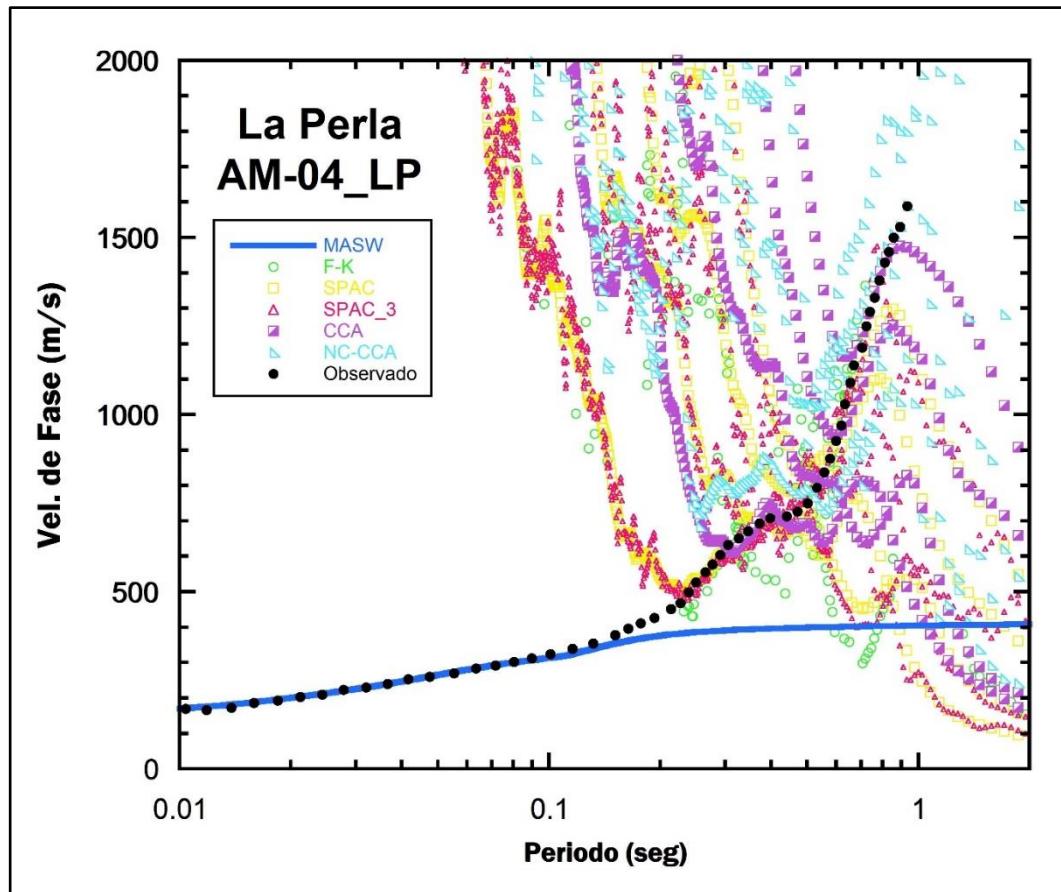
DISTRITO: San Miguel

V_{s30} PROMEDIO: 424 m/s



**ANEXO D-10: CURVAS DE DISPERSIÓN – ARREGLOS DE
MICROTREMORES**

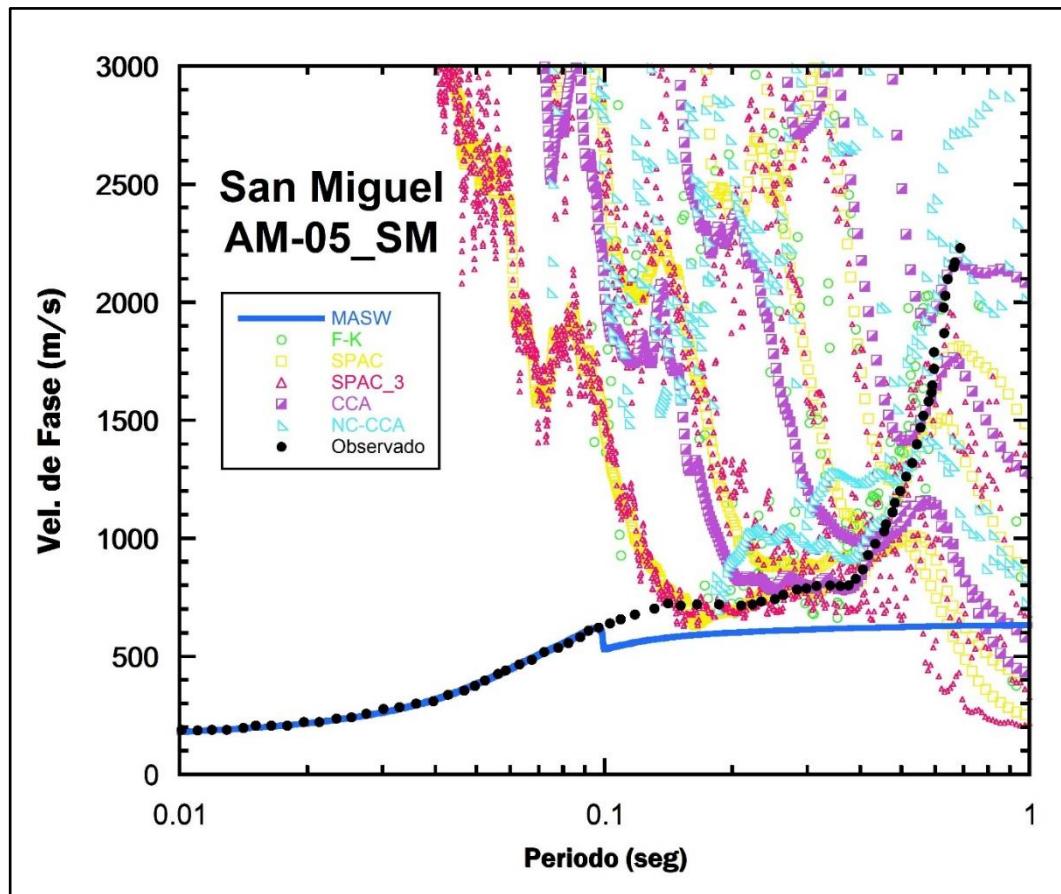
AM-04 LP (EJECUTADO)



DISTRITO: La Perla

RADIOS DE ARREGLOS: 50 m, 100 m, 150 m y 200 m

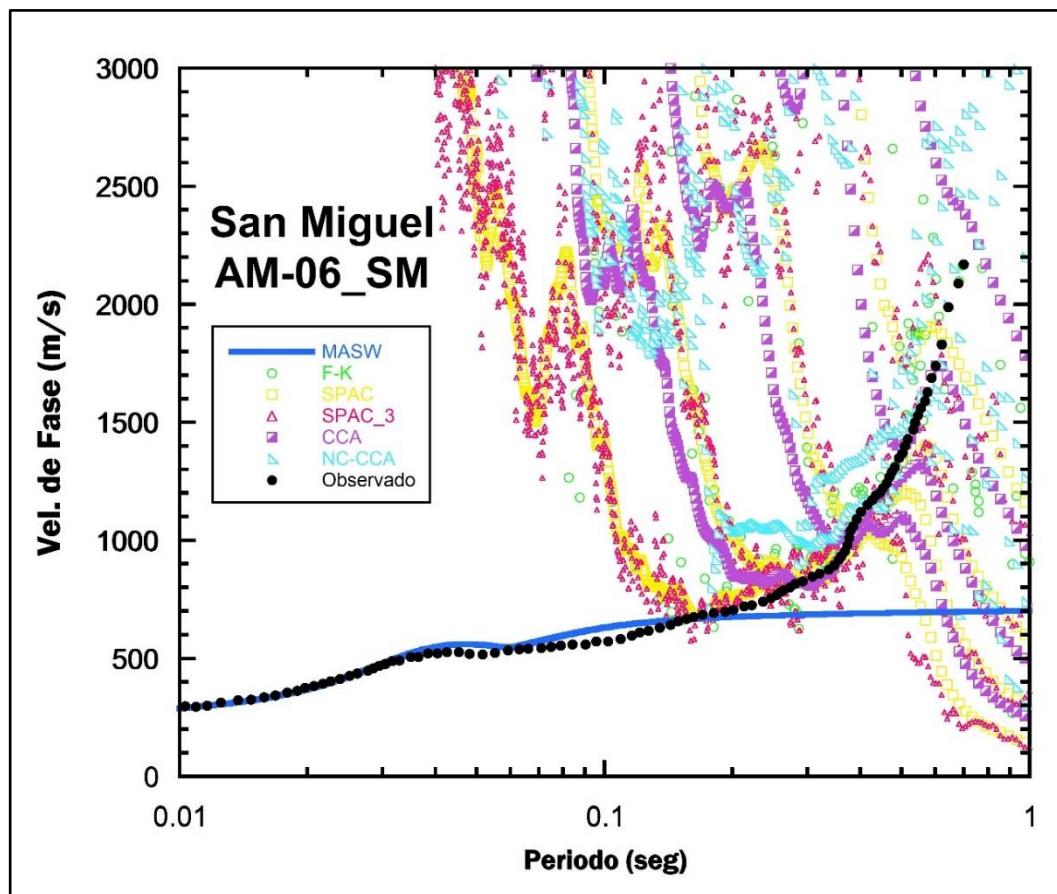
AM-05 SM (EJECUTADO)



DISTRITO: San Miguel

RADIOS DE ARREGLOS: 50 m, 100 m, 200 m y 300 m

AM-06 SM (EJECUTADO)

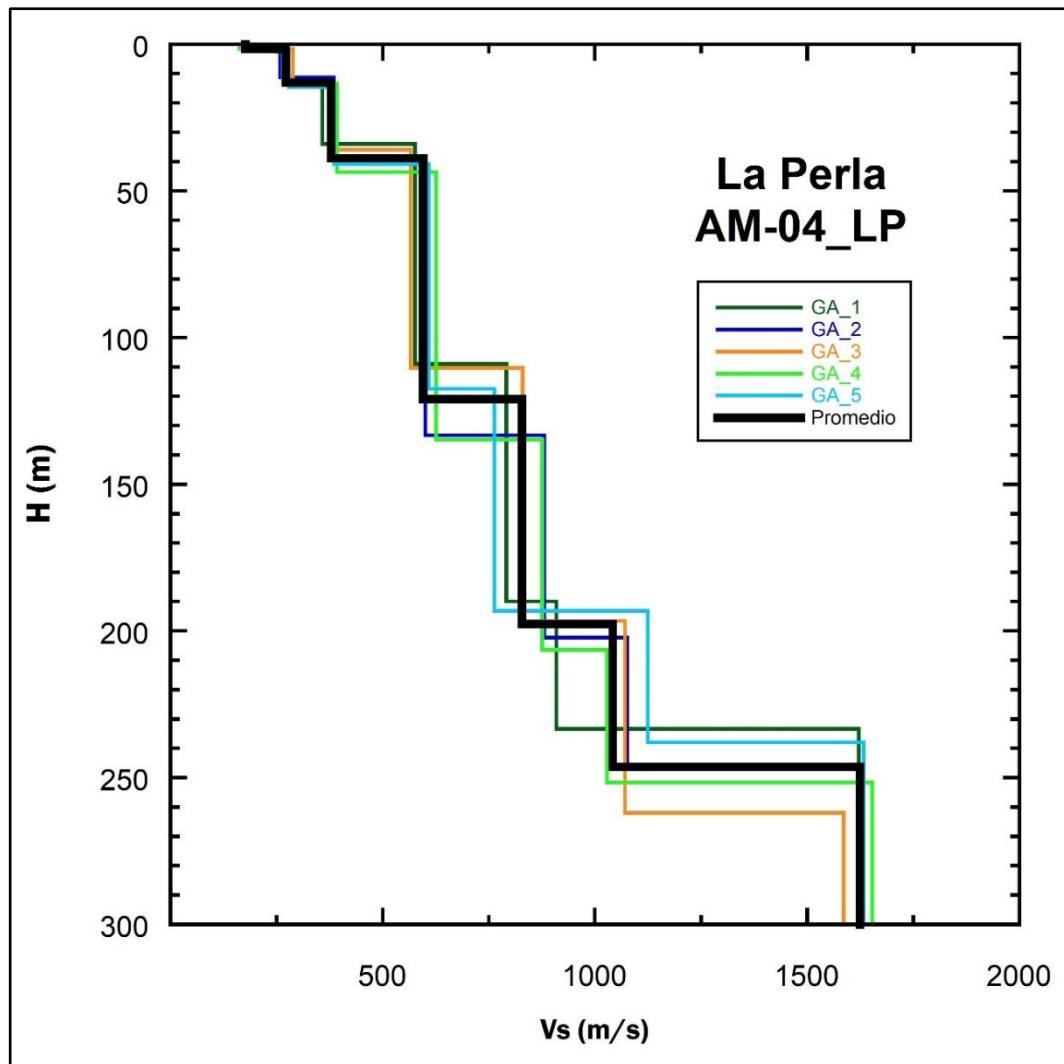


DISTRITO: San Miguel

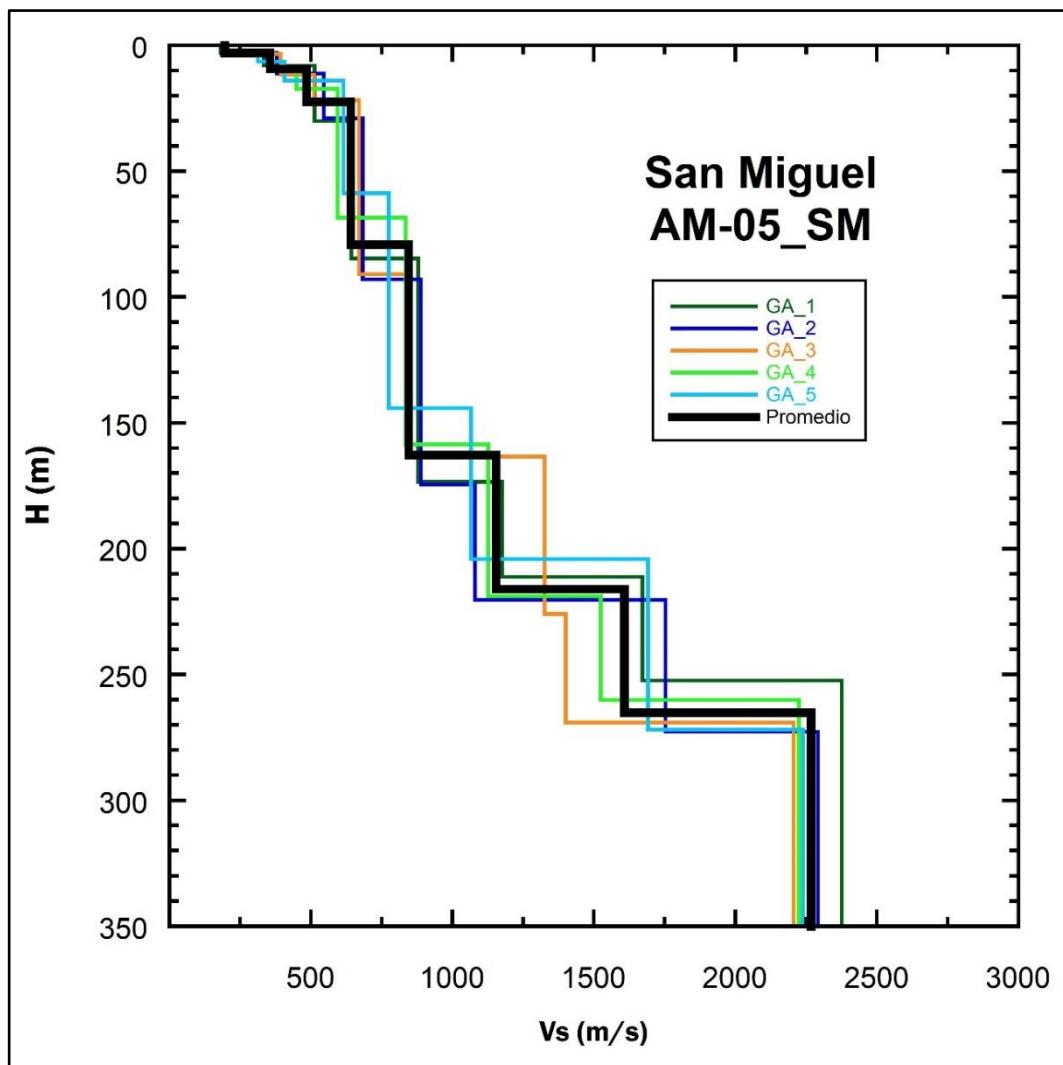
RADIOS DE ARREGLOS: 50 m, 100 m, 200 m y 400 m

**ANEXO D-11: PERFILES VS PROFUNDOS – ARREGLOS DE
MICROTREMORES**

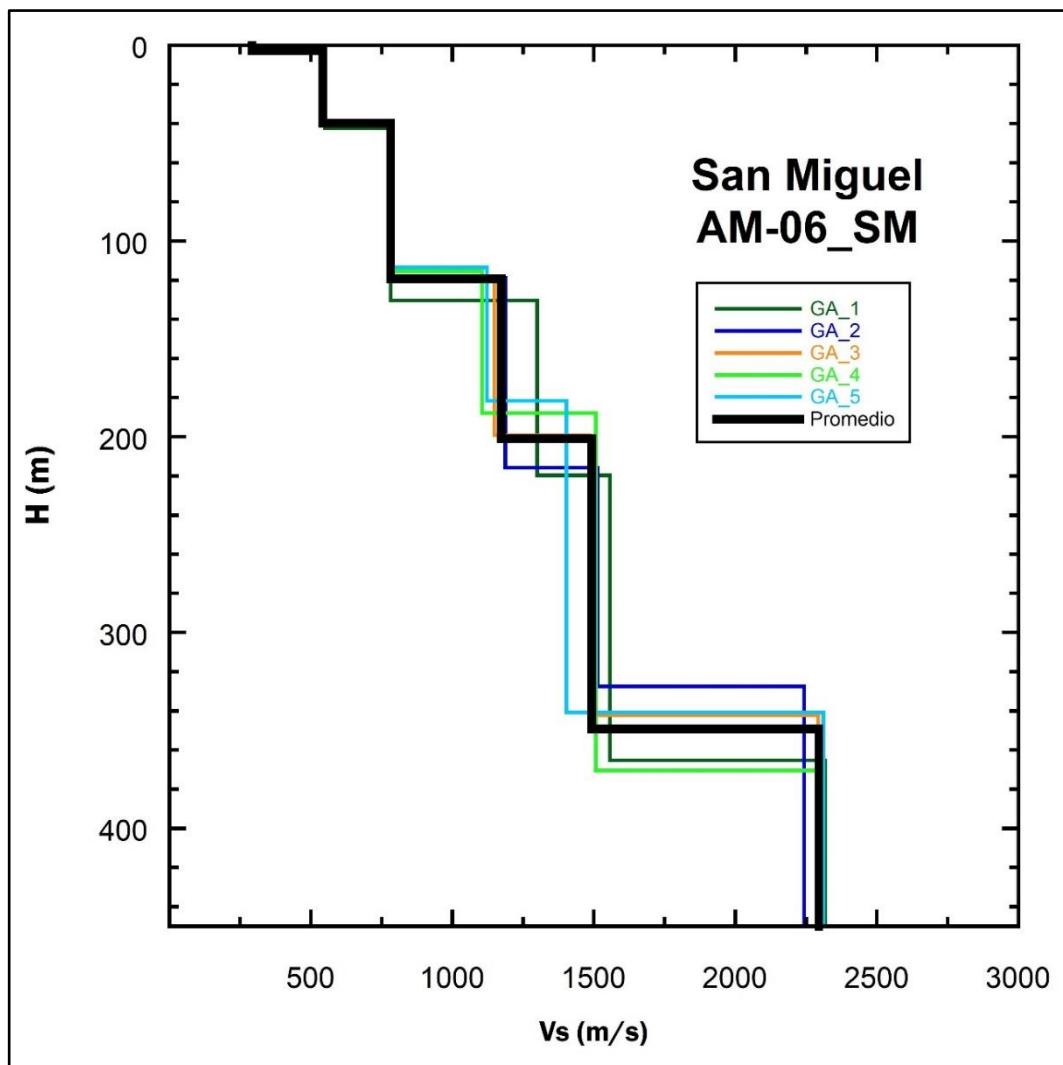
AM-04 LP (EJECUTADO)



AM-05 SM (EJECUTADO)

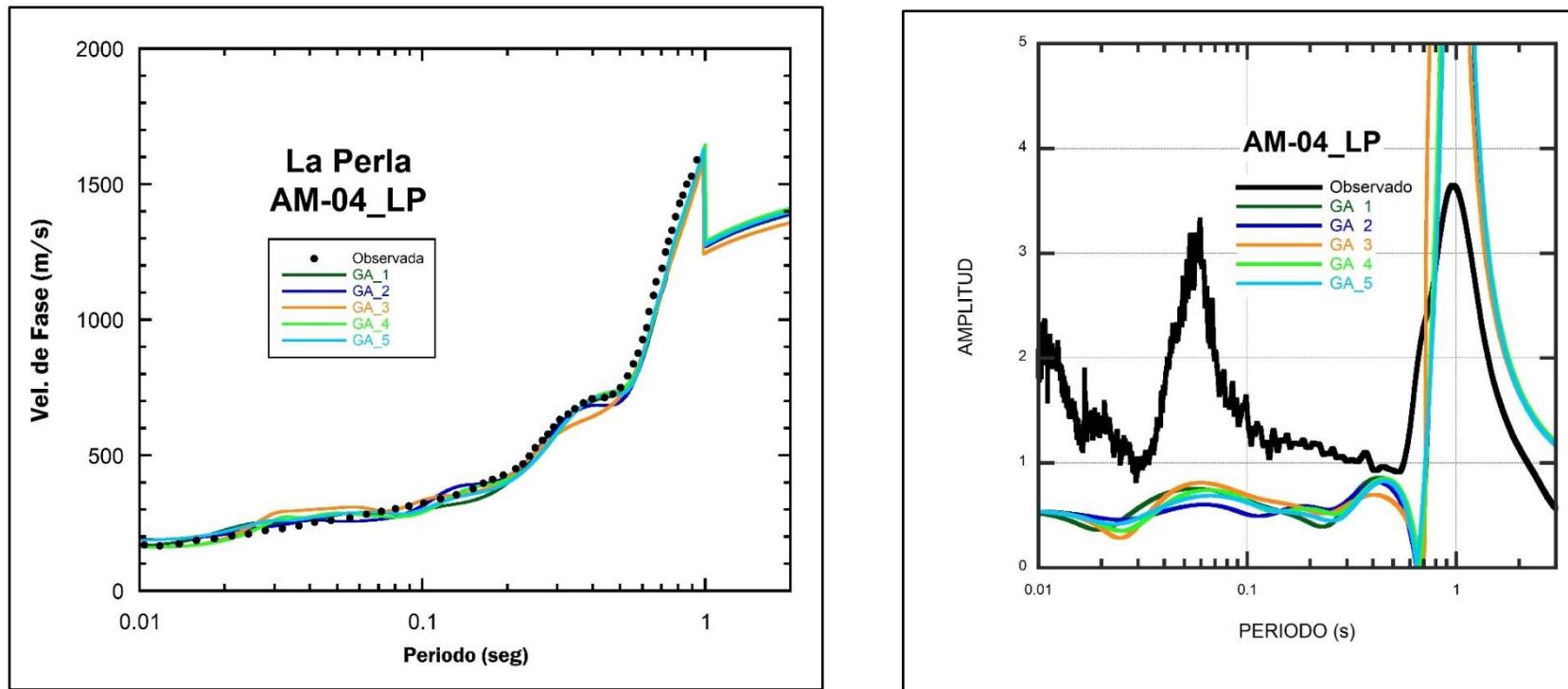


AM-06 SM (EJECUTADO)



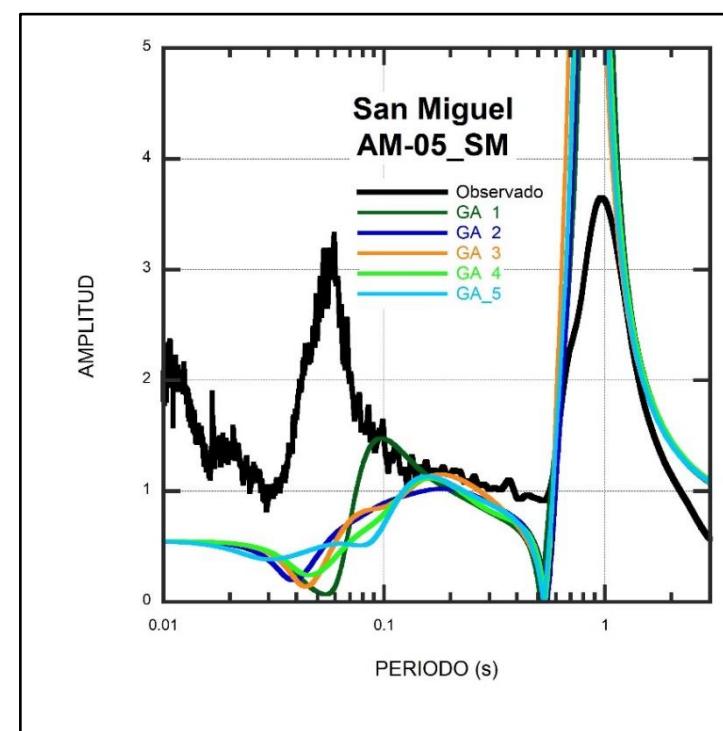
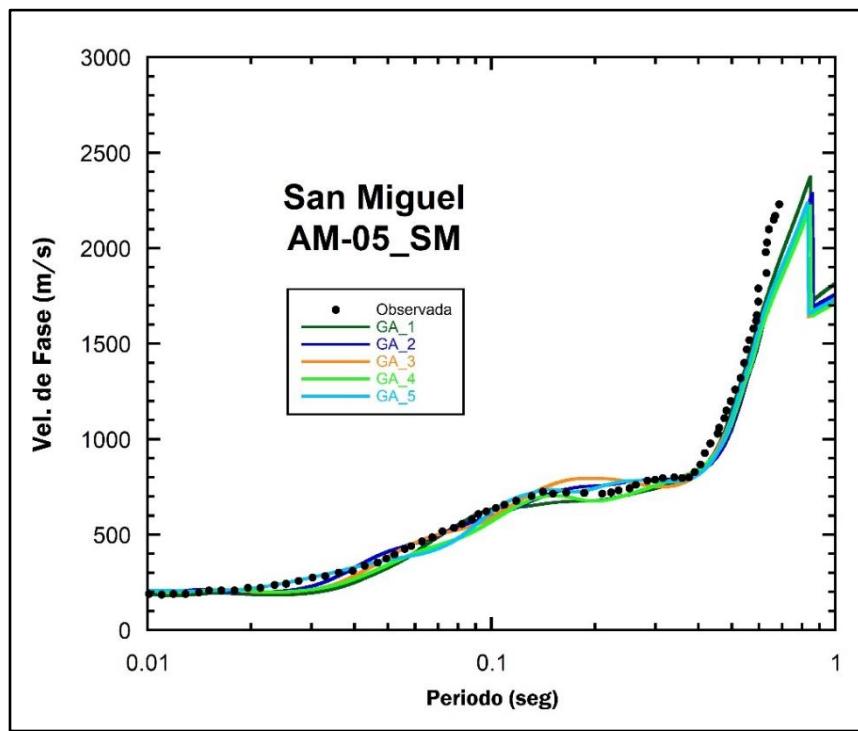
ANEXO D-12: VERIFICACIÓN DE PERFILES VS PROFUNDOS ESTIMADOS

AM-04_LP (EJECUTADO)



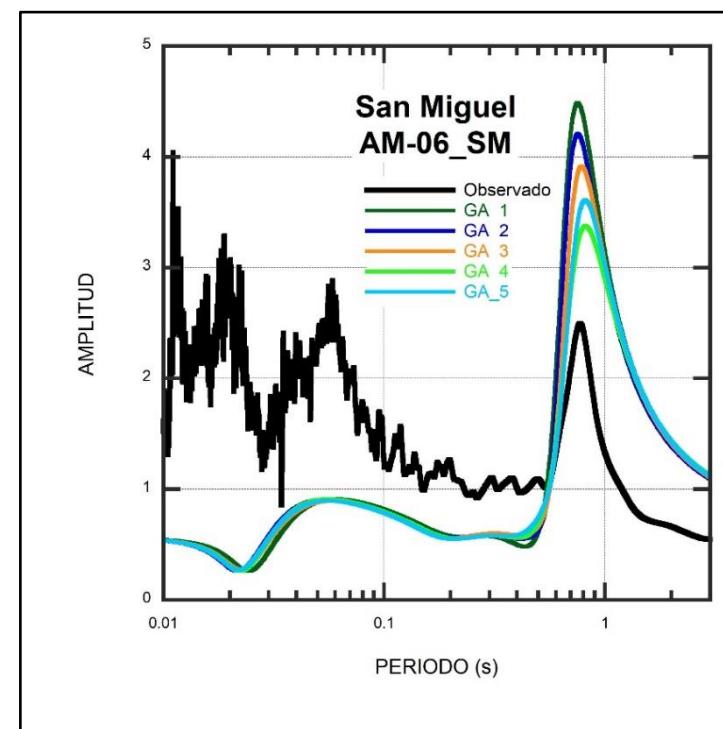
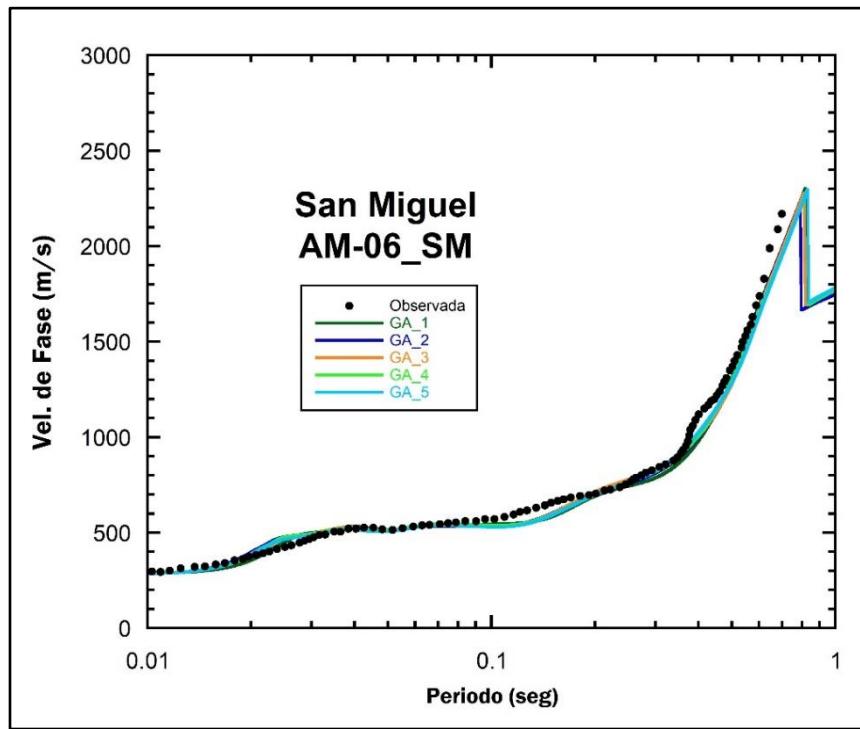
DISTRITO: La Perla

AM-05_SM (EJECUTADO)



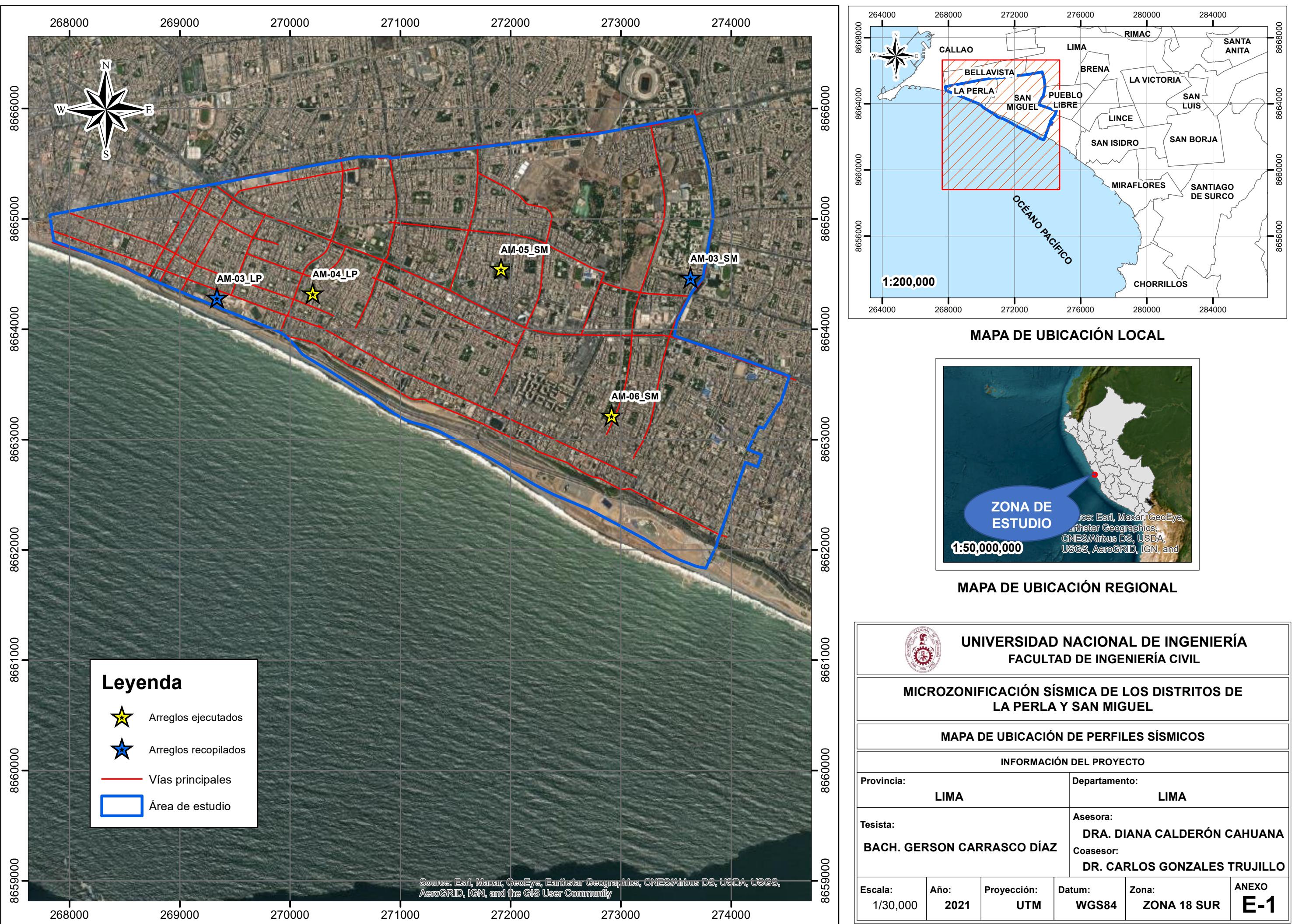
DISTRITO: San Miguel

AM-06_SM (EJECUTADO)



DISTRITO: San Miguel

ANEXO E



ANEXO E-2: ESCENARIOS SÍSMICOS
TERREMOTO DE LIMA Y CALLAO DE 1966

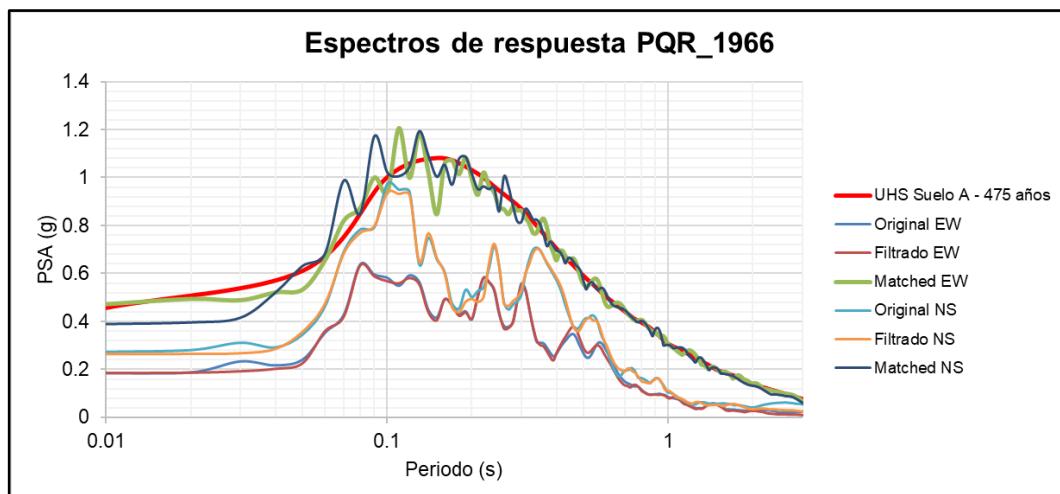
INFORMACIÓN BÁSICA:

INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN ACELEROGRÁFICA	
Nombre	Parque de la Reserva
Código	PQR
Ubicación	Parque de la Reserva, Cercado de Lima, Lima
Latitud	-12.07°
Longitud	-77.04°
Modelo de acelerógrafo	Analógico

INFORMACIÓN DEL SISMO	
Día	17 de octubre de 1966
Latitud	-10.7°
Longitud	-78.7°
Profundidad	24 km
Magnitud	8.1 Mw

INFORMACIÓN DEL REGISTRO SÍSMICO	
PGA X	-180.56 cm/s ²
PGA Y	-268.24 cm/s ²
PGA Z	94.29 cm/s ²
Fuente	http://www.cismid-uni.org

ESPECTROS DE RESPUESTA:



TERREMOTO DE ÁNCASH DE 1970

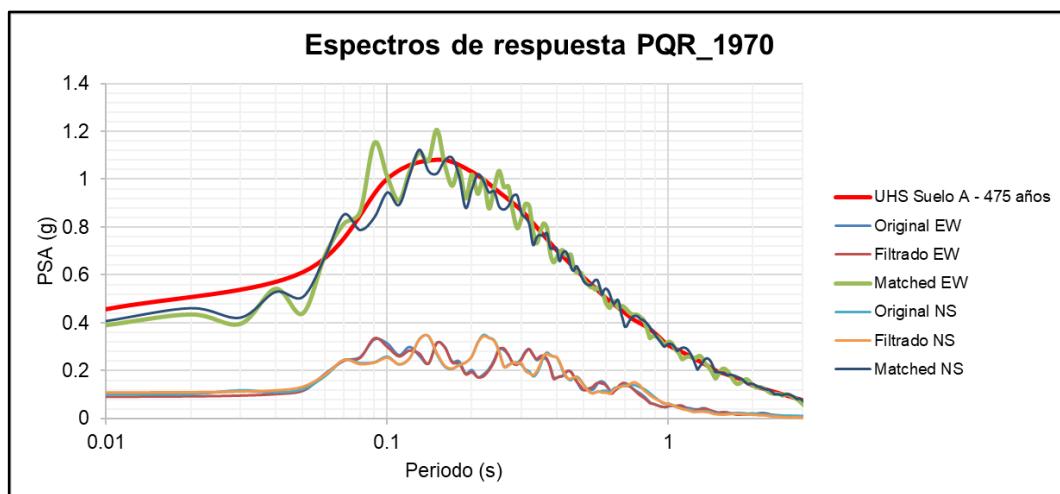
INFORMACIÓN BÁSICA:

INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN ACELEROGRÁFICA	
Nombre	Parque de la Reserva
Código	PQR
Ubicación	Parque de la Reserva, Cercado de Lima, Lima
Latitud	-12.07°
Longitud	-77.04°
Modelo de acelerógrafo	Analógico

INFORMACIÓN DEL SISMO	
Día	31 de mayo de 1970
Latitud	-9.36°
Longitud	-78.87°
Profundidad	64 Km
Magnitud	7.9 Mw

INFORMACIÓN DEL REGISTRO SÍSMICO	
PGA X	-105.05 cm/s ²
PGA Y	-97.81 cm/s ²
PGA Z	74.03 cm/s ²
Fuente	http://www.cismid-uni.org

ESPECTROS DE RESPUESTA:



TERREMOTO DE LIMA DE 1974

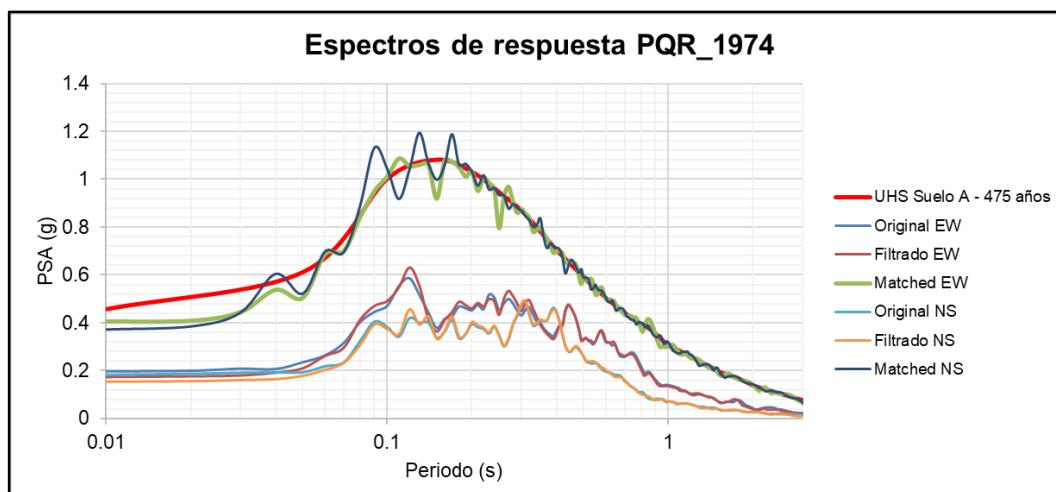
INFORMACIÓN BÁSICA:

INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN ACELEROGRÁFICA	
Nombre	Parque de la Reserva
Código	PQR
Ubicación	Parque de la Reserva, Cercado de Lima, Lima
Latitud	-12.07°
Longitud	-77.04°
Modelo de acelerógrafo	Analógico

INFORMACIÓN DEL SISMO	
Día	3 de octubre de 1974
Latitud	-12.5°
Longitud	-77.98°
Profundidad	13 Km
Magnitud	8.1 Mw

INFORMACIÓN DEL REGISTRO SÍSMICO	
PGA X	-194.21 cm/s ²
PGA Y	180.09 cm/s ²
PGA Z	100.3 cm/s ²
Fuente	http://www.cismid-uni.org

ESPECTROS DE RESPUESTA:



TERREMOTO DE LIMA DE 1974

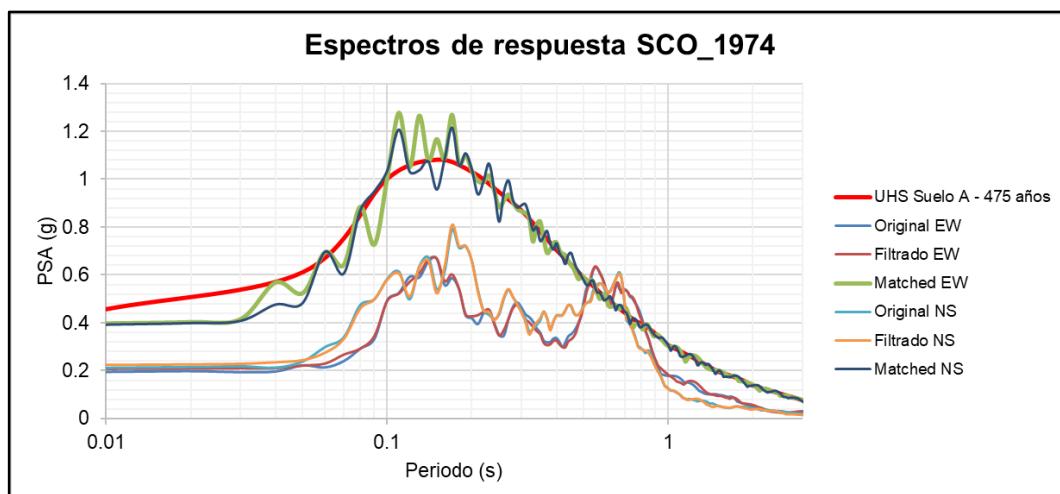
INFORMACIÓN BÁSICA:

INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN ACELEROGRÁFICA	
Nombre	Estación Surco
Código	SCO
Ubicación	House of Dr. Huaco, Surco, Lima
Latitud	-12.13°
Longitud	-76.98°
Modelo de acelerógrafo	Analógico

INFORMACIÓN DEL SISMO	
Día	3 de octubre de 1974
Latitud	-12.5°
Longitud	-77.98°
Profundidad	13 Km
Magnitud	8.1 Mw

INFORMACIÓN DEL REGISTRO SÍSMICO	
PGA X	191.89 cm/s ²
PGA Y	-207.35 cm/s ²
PGA Z	-125.74 cm/s ²
Fuente	http://www.cismid-uni.org

ESPECTROS DE RESPUESTA:



TERREMOTO DEL SUR DEL PERÚ DE 2001

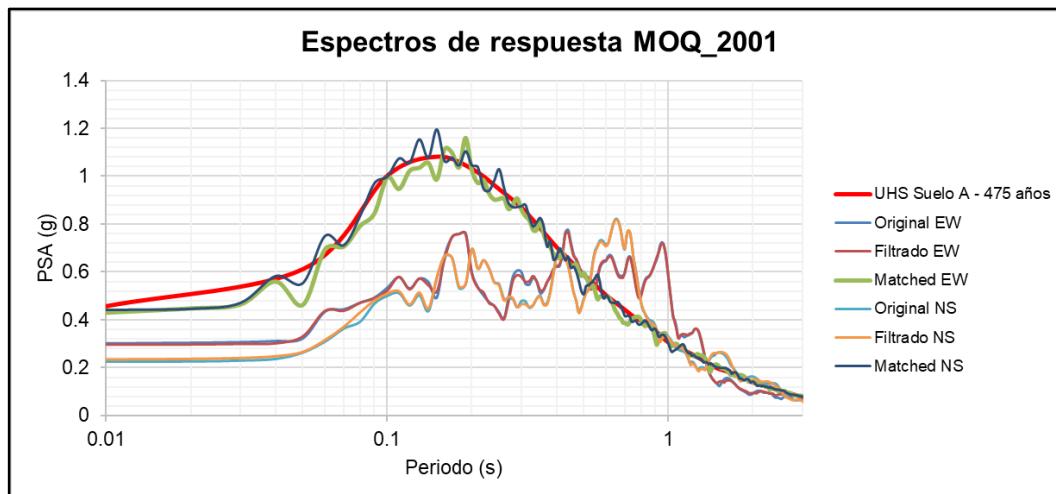
INFORMACIÓN BÁSICA:

INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN ACELEROGRÁFICA	
Nombre	César Vizcarra Vargas
Código	MOQ001
Ubicación	Rolando Catacora Sports Complex - Regional Government of Moquegua, Moquegua, Mariscal Nieto
Latitud	-17.186°
Longitud	-70.928°
Modelo de acelerógrafo	RION SM-10B

INFORMACIÓN DEL SISMO	
Día	23 de junio del 2001
Latitud	-16.08°
Longitud	-73.77°
Profundidad	33 Km
Magnitud	8.4 Mw

INFORMACIÓN DEL REGISTRO SÍSMICO	
PGA X	-295.15 cm/s ²
PGA Y	219.99 cm/s ²
PGA Z	160.74 cm/s ²
Fuente	http://www.cismid-uni.org

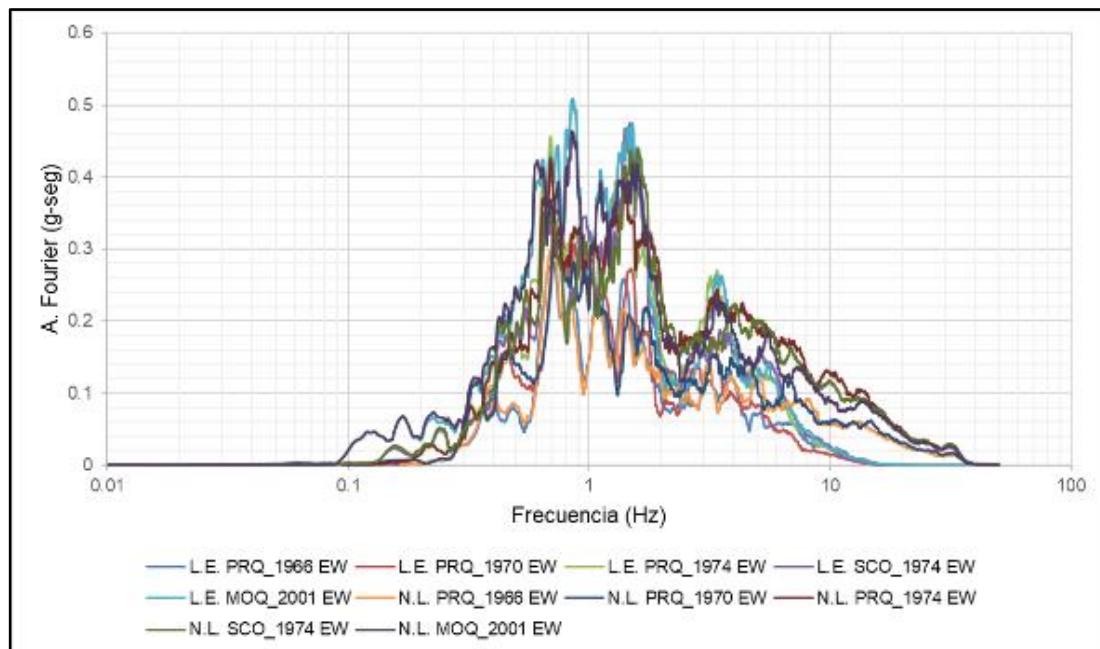
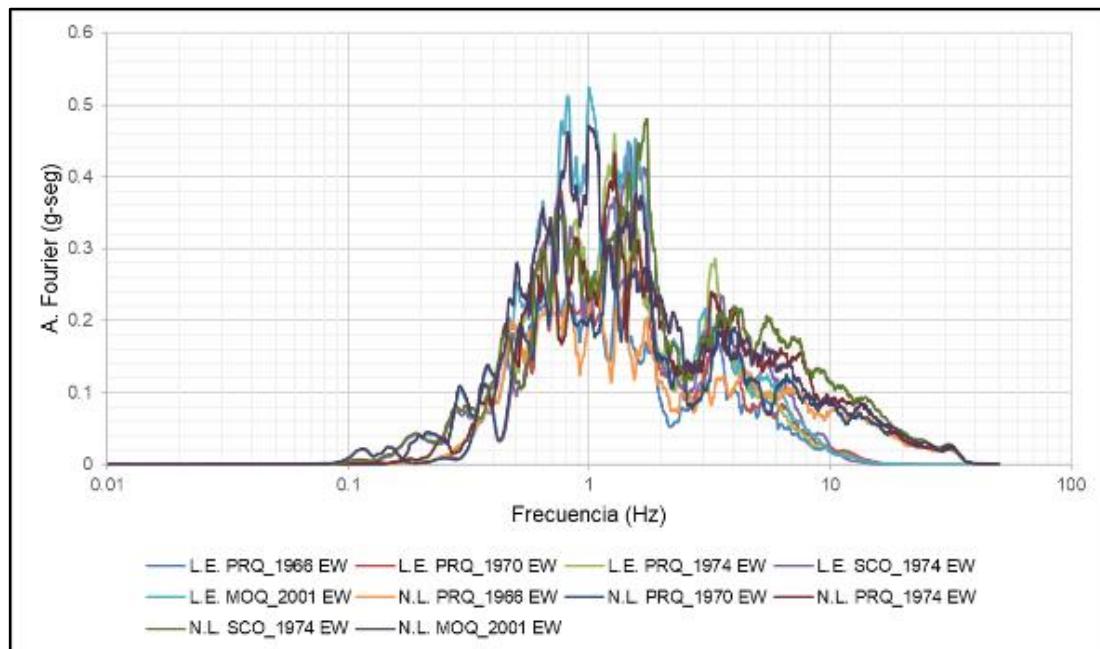
ESPECTROS DE RESPUESTA:



ANEXO E-3: RESPUESTA DE SITIO

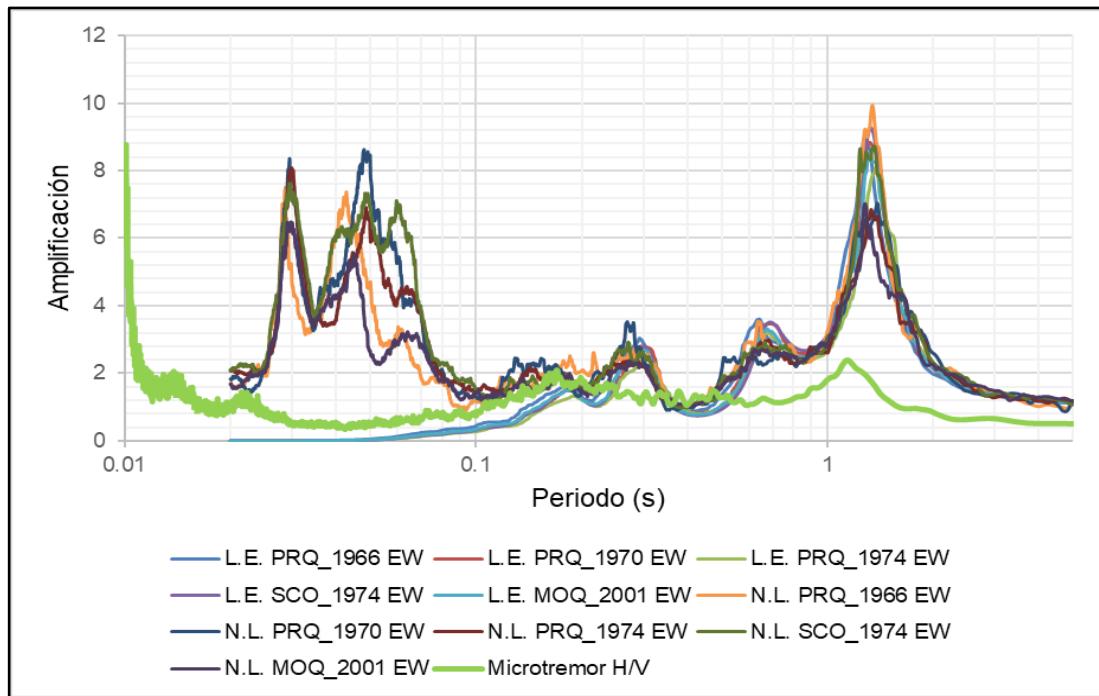
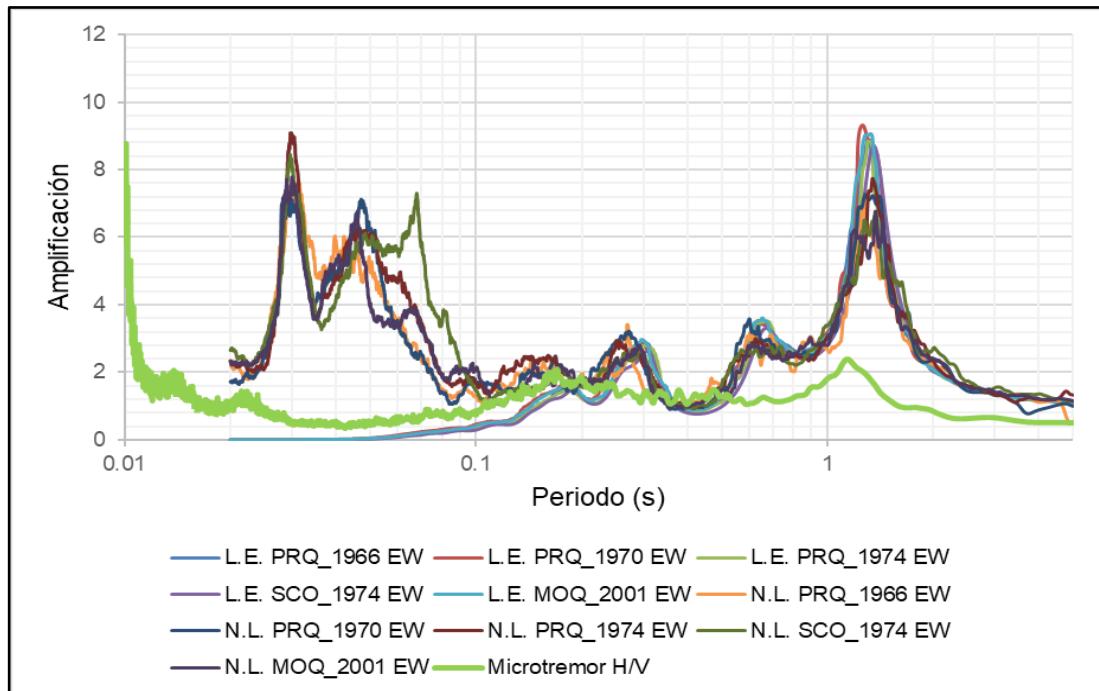
PERFIL AM-03 LP

ESPECTRO DE FOURIER EN LA SUPERFICIE:



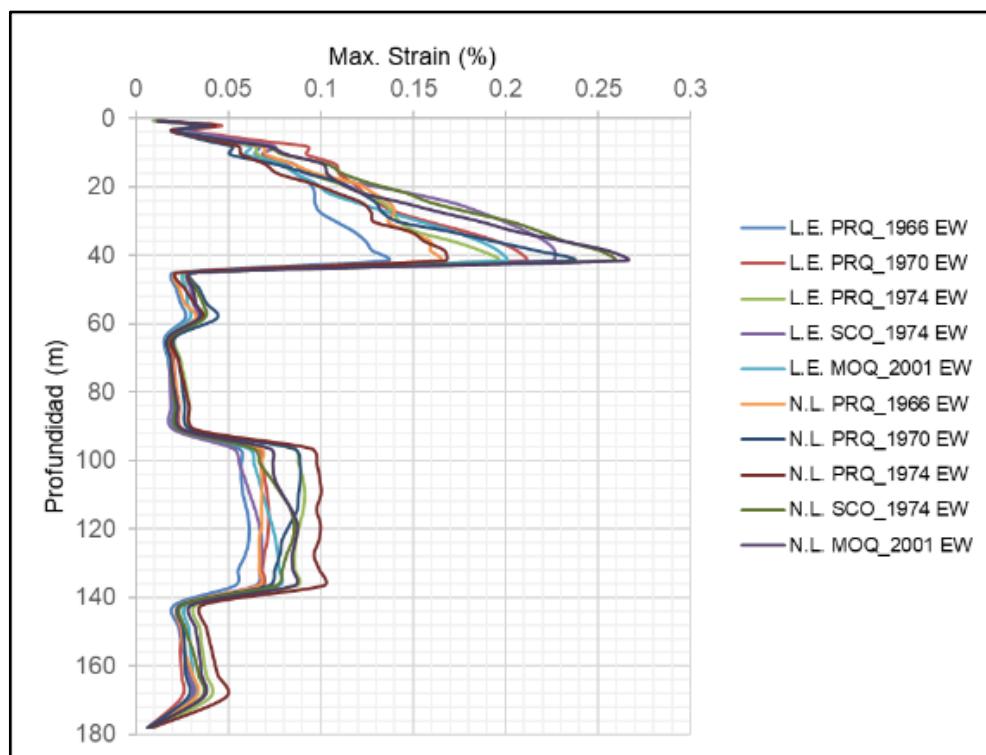
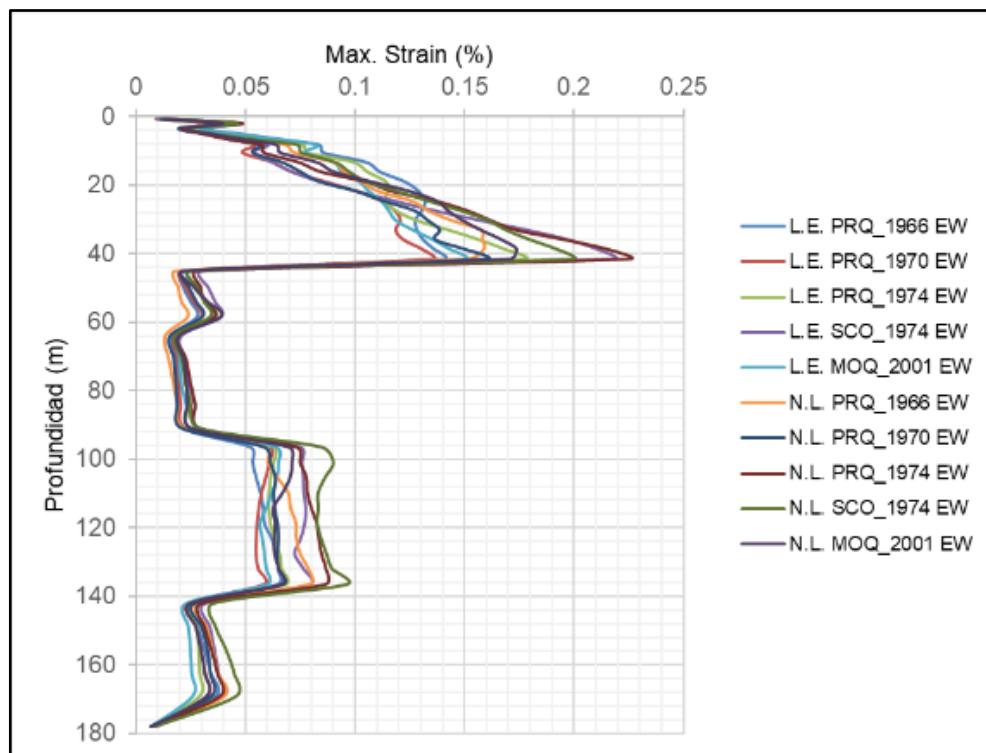
PERFIL AM-03 LP

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA:



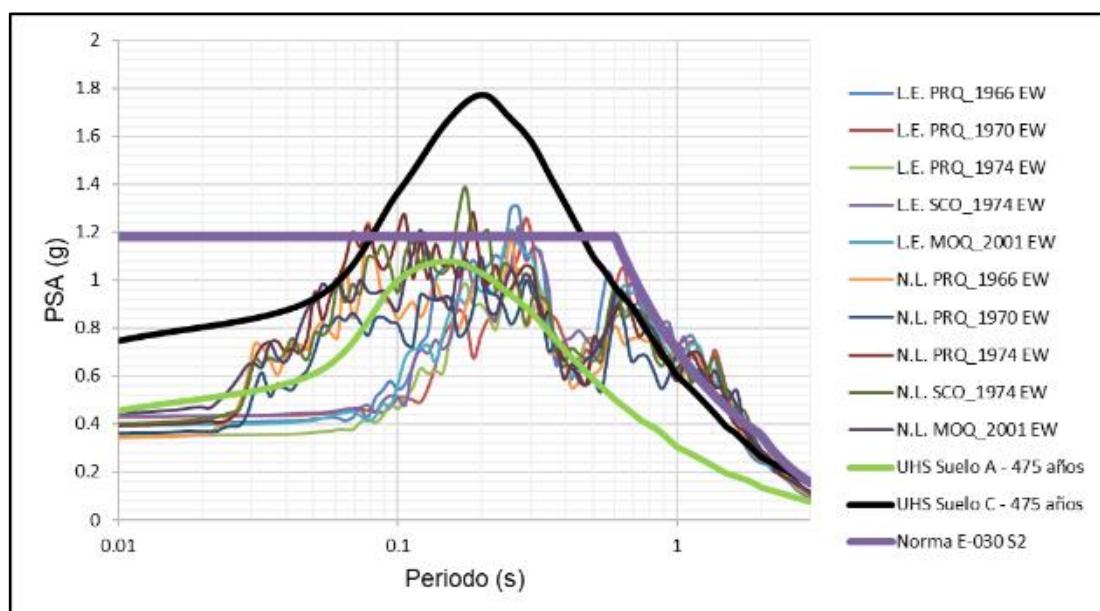
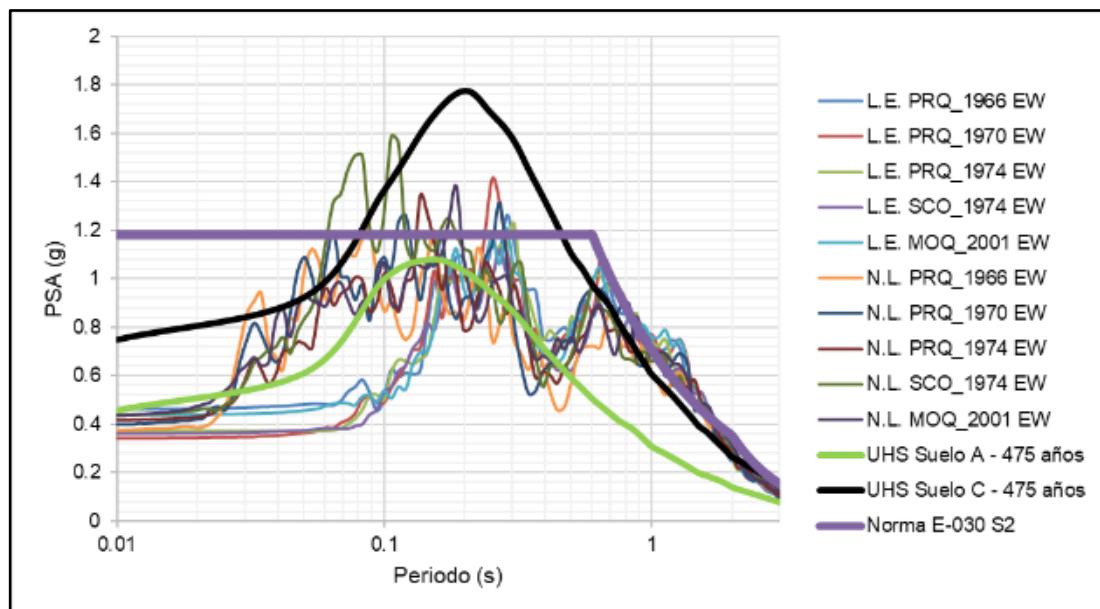
PERFIL AM-03 LP

PERFIL DE DEFORMACIONES MÁXIMAS:



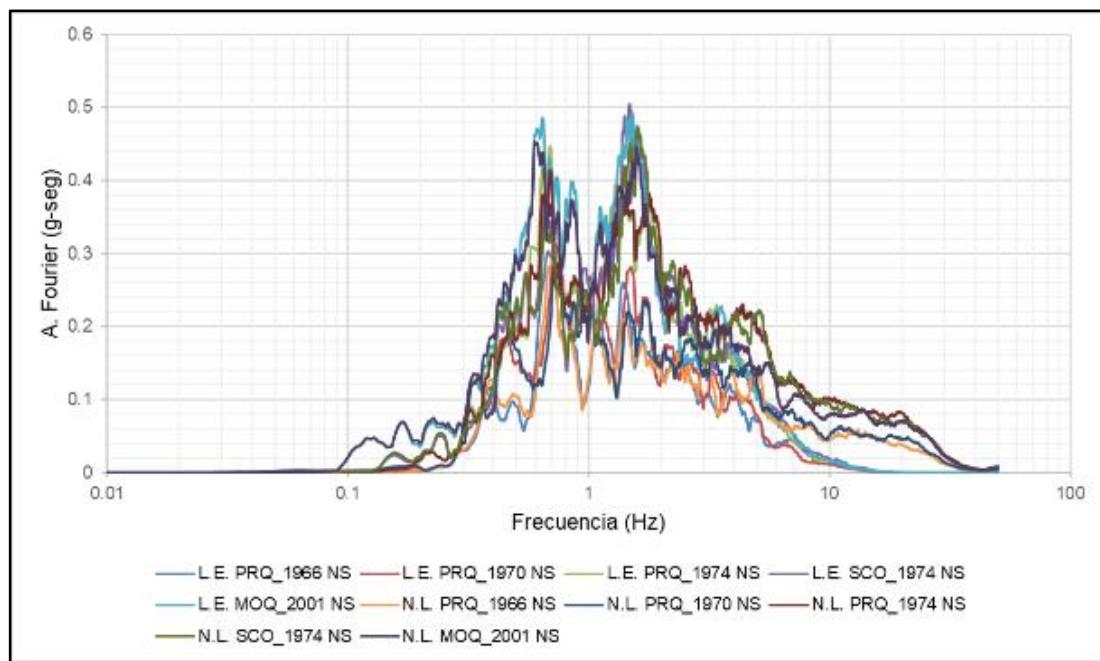
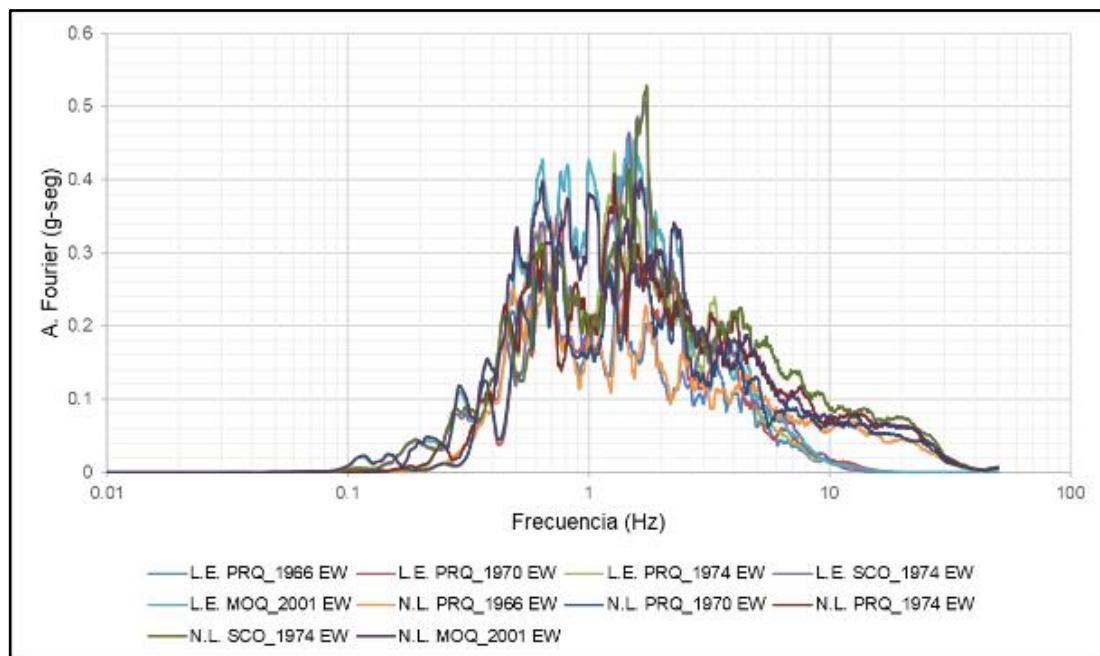
PERFIL AM-03 LP

ESPECTROS DE RESPUESTA:



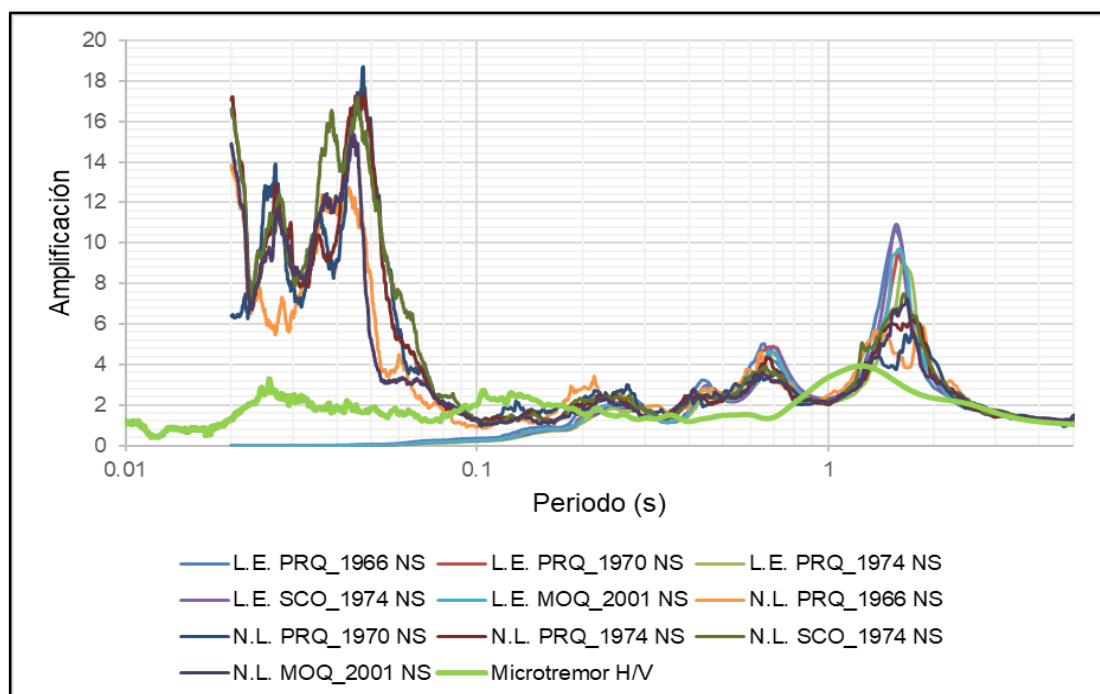
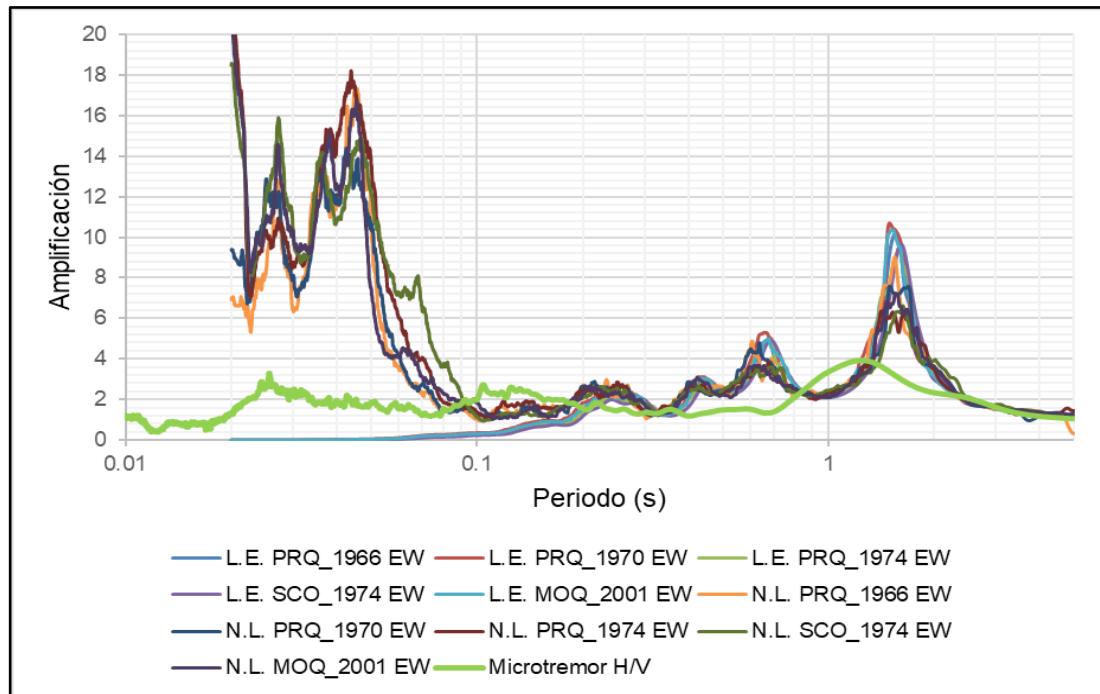
PERFIL AM-04 LP

ESPECTRO DE FOURIER EN LA SUPERFICIE:



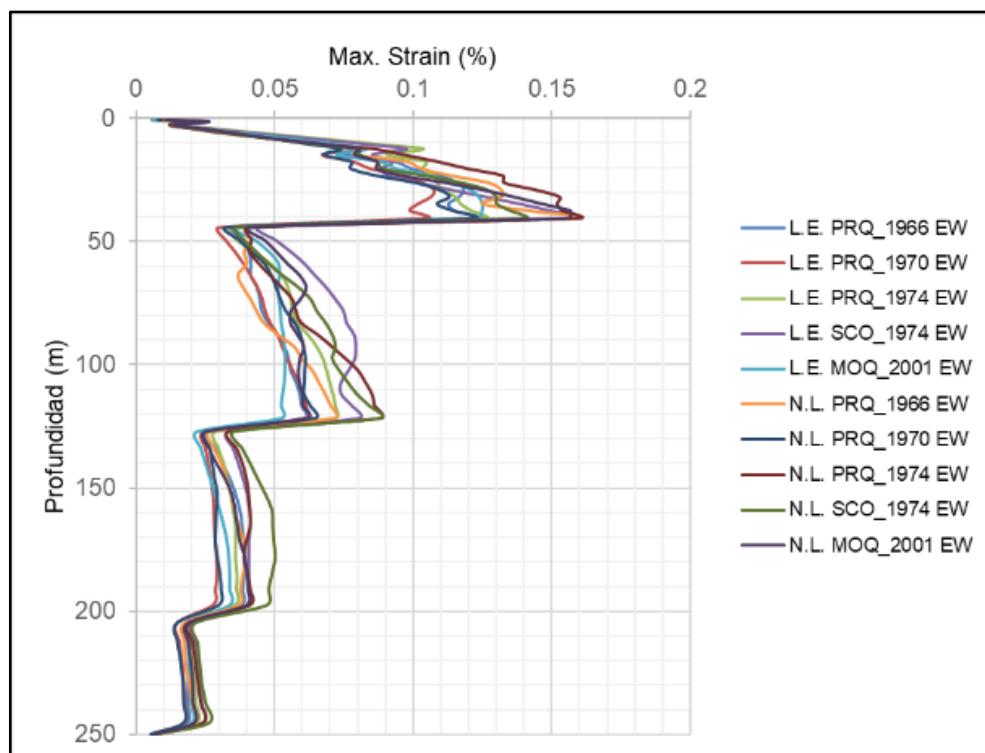
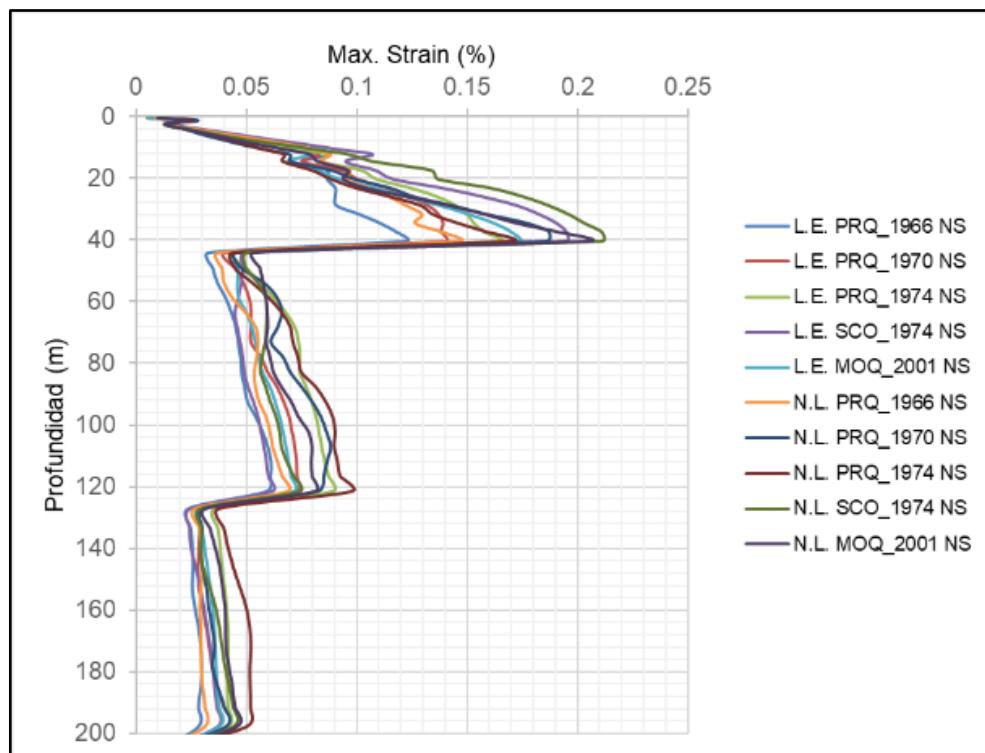
PERFIL AM-04 LP

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA:



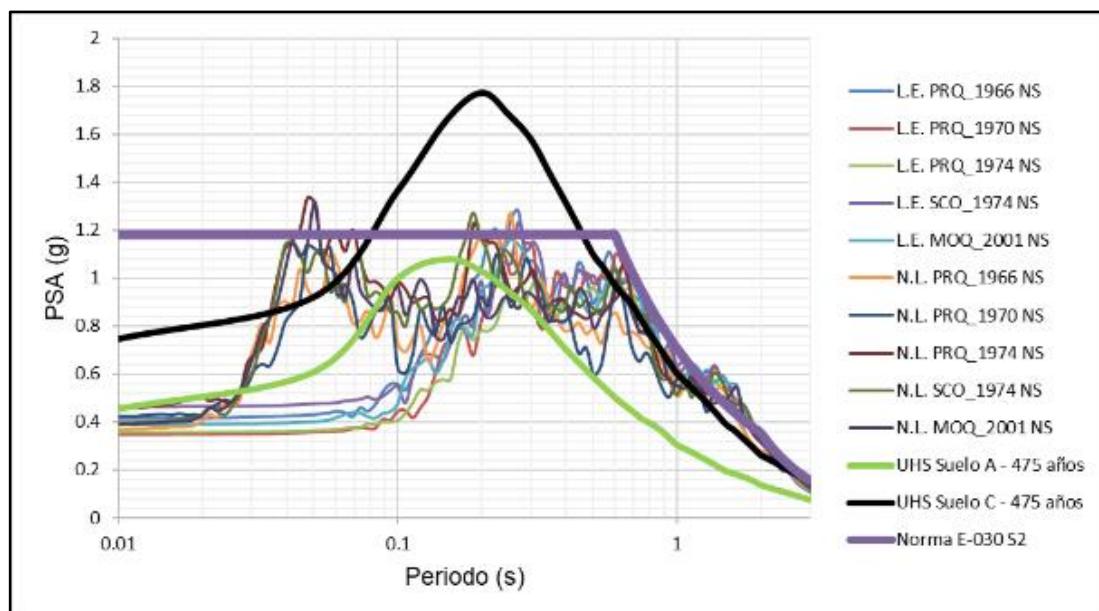
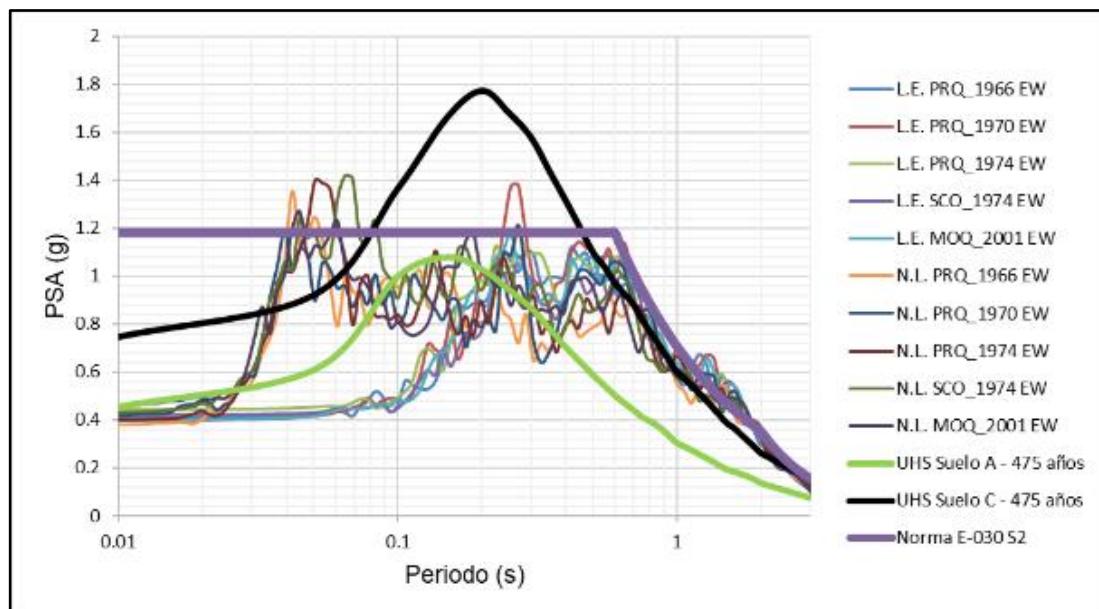
PERFIL AM-04 LP

PERFIL DE DEFORMACIONES MÁXIMAS:



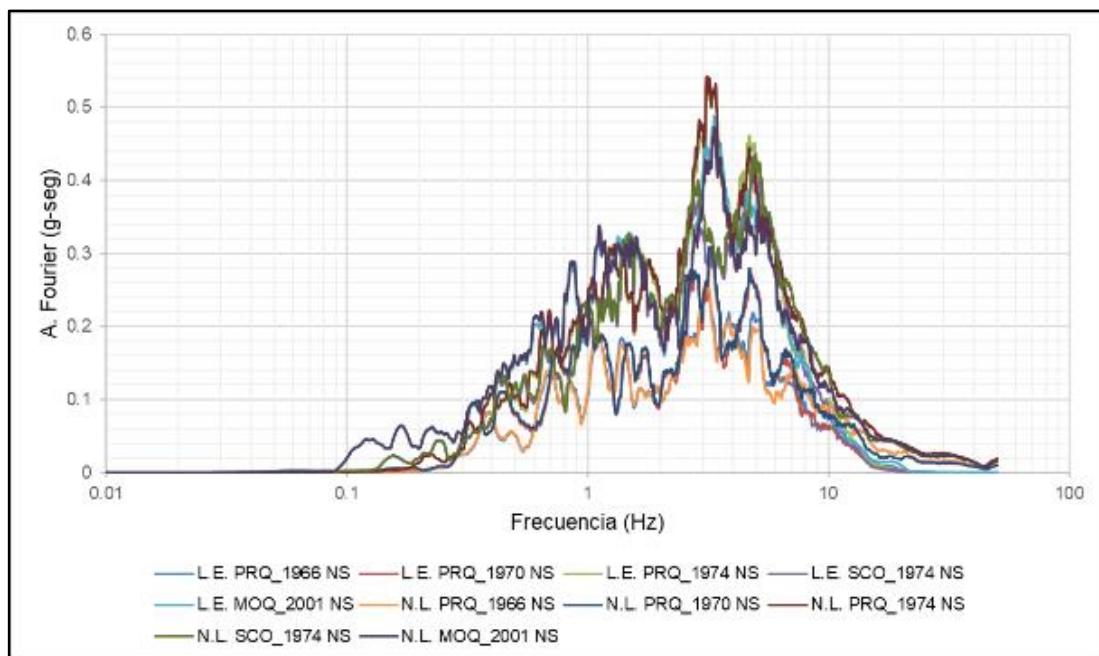
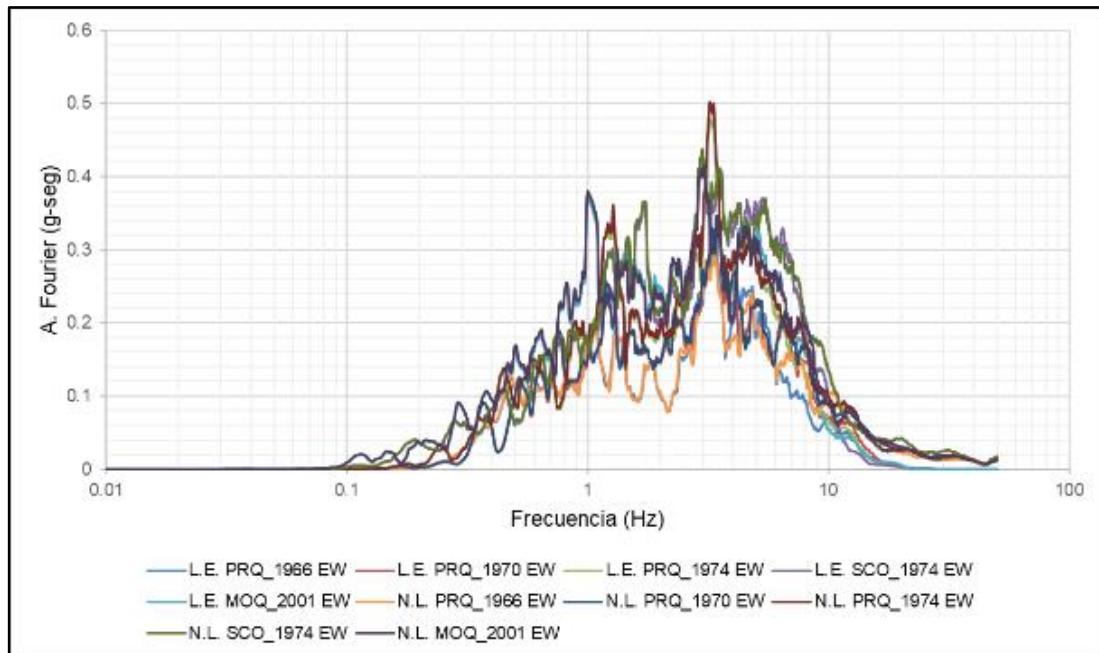
PERFIL AM-04 LP

ESPECTROS DE RESPUESTA:



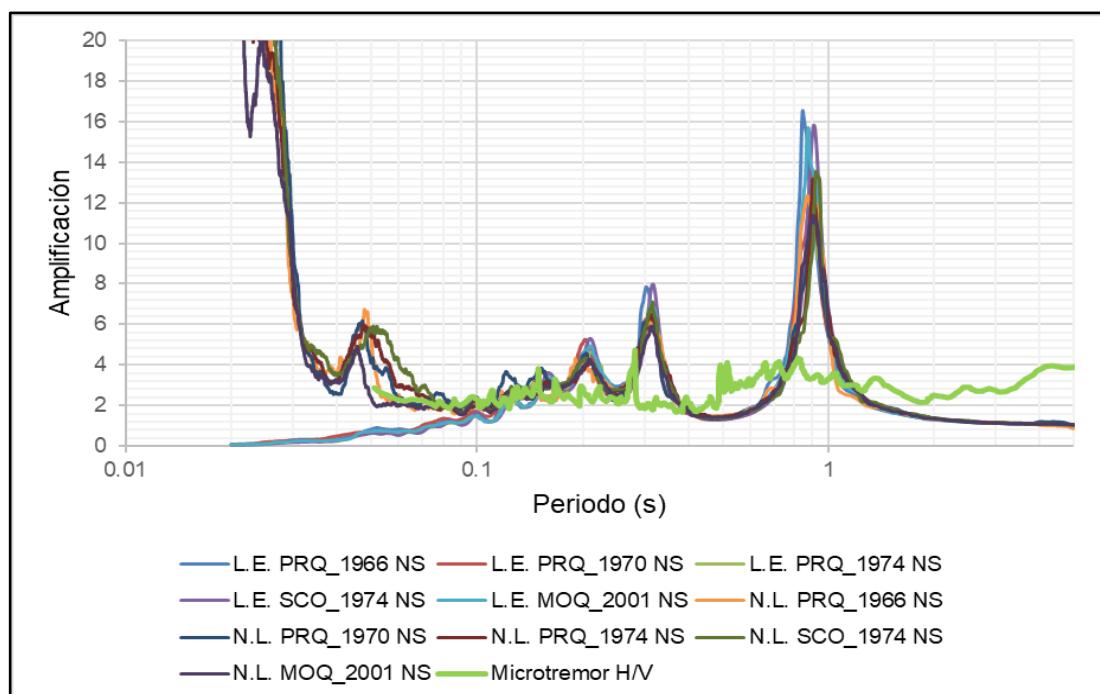
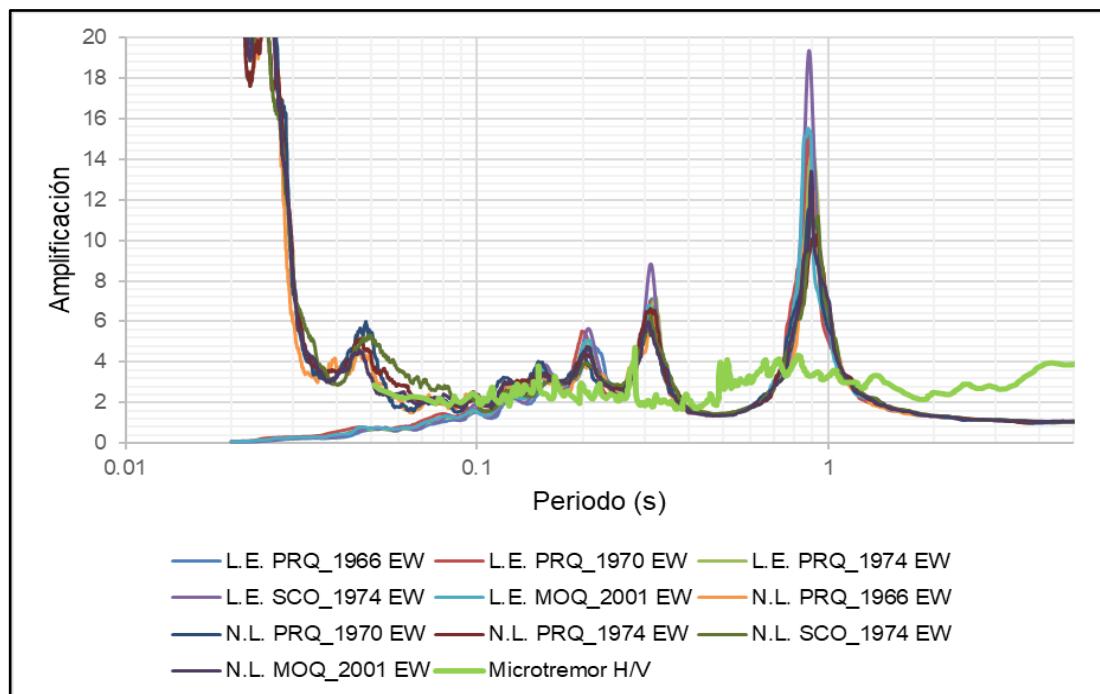
PERFIL AM-03 SM

ESPECTRO DE FOURIER EN LA SUPERFICIE:



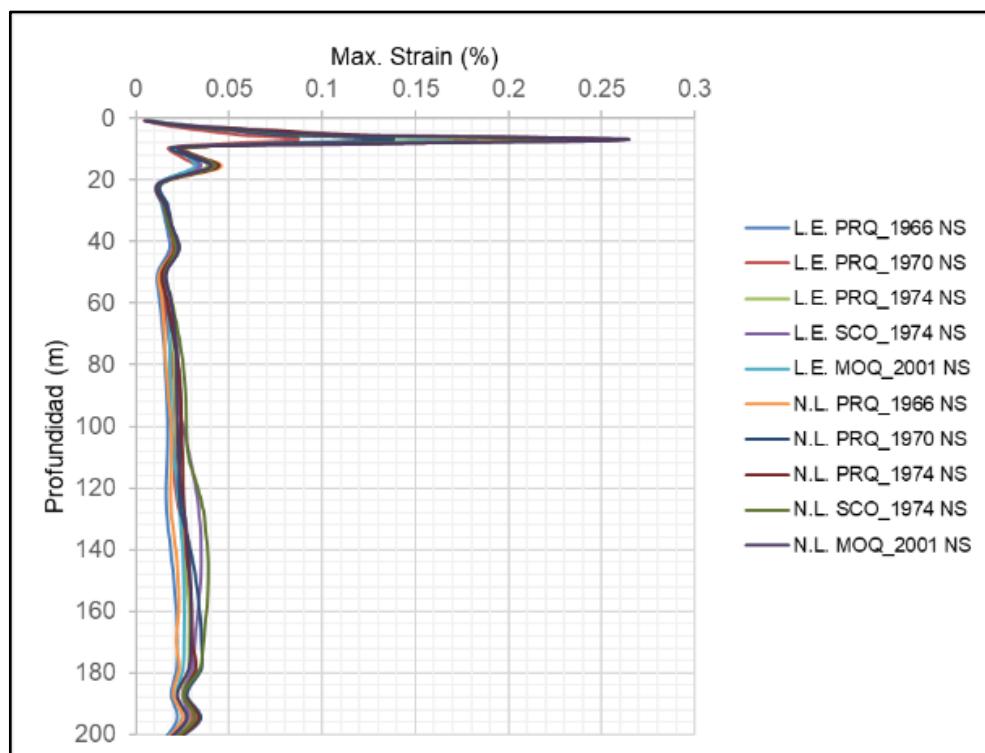
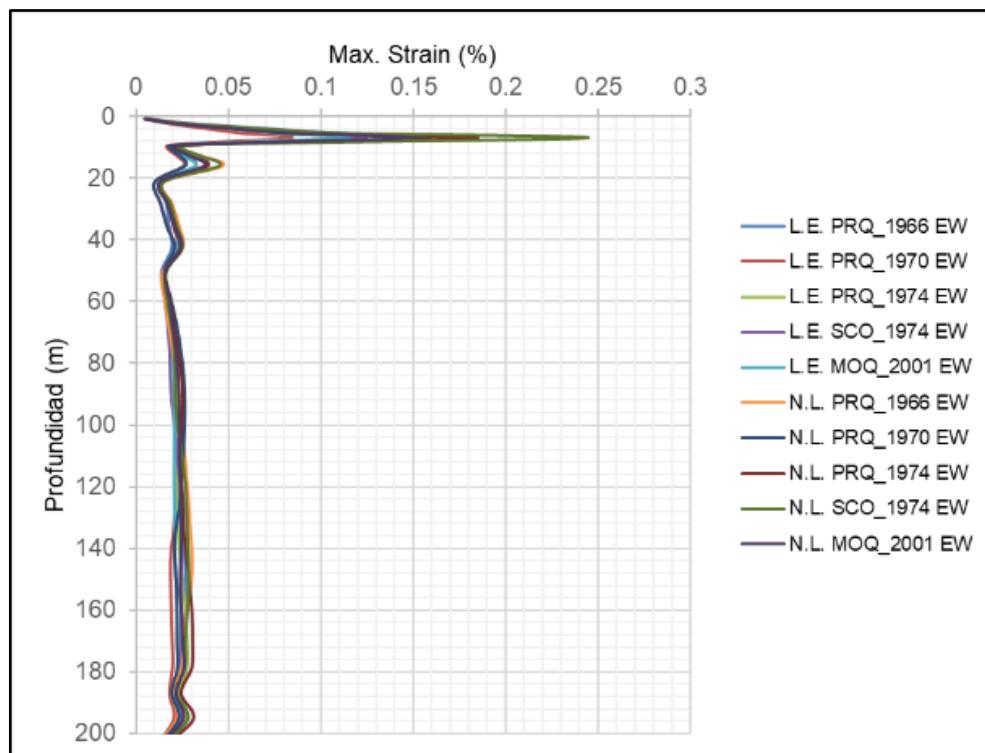
PERFIL AM-03 SM

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA:



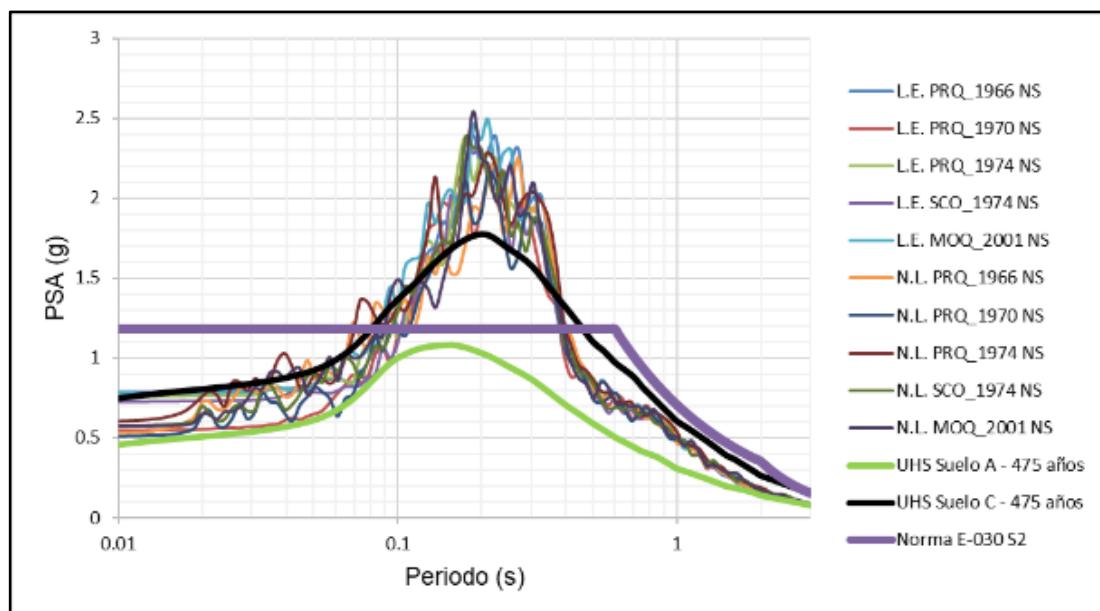
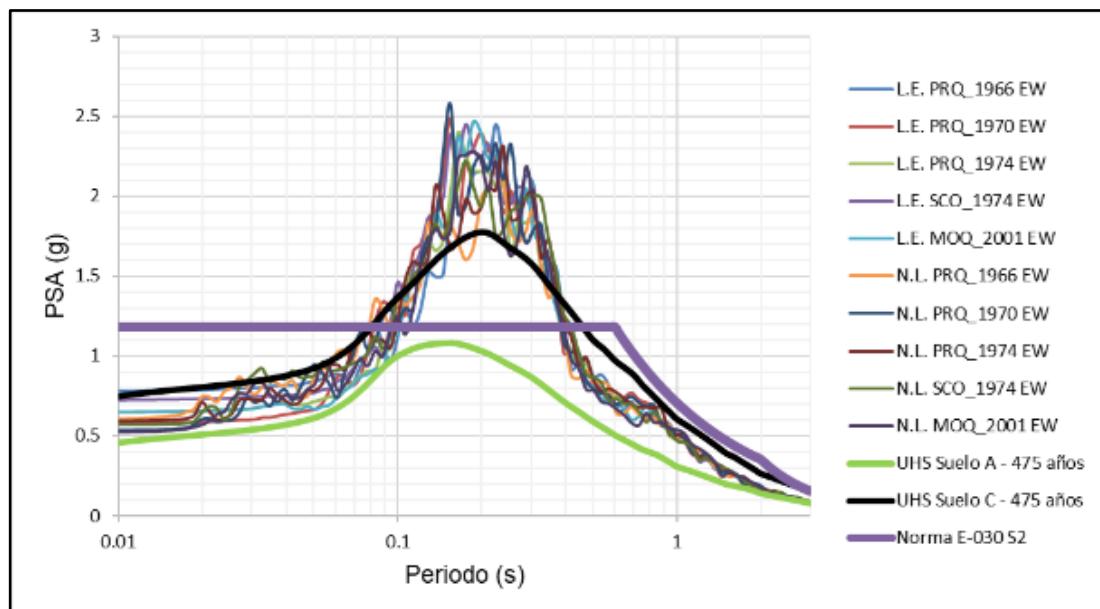
PERFIL AM-03 SM

PERFIL DE DEFORMACIONES MÁXIMAS:



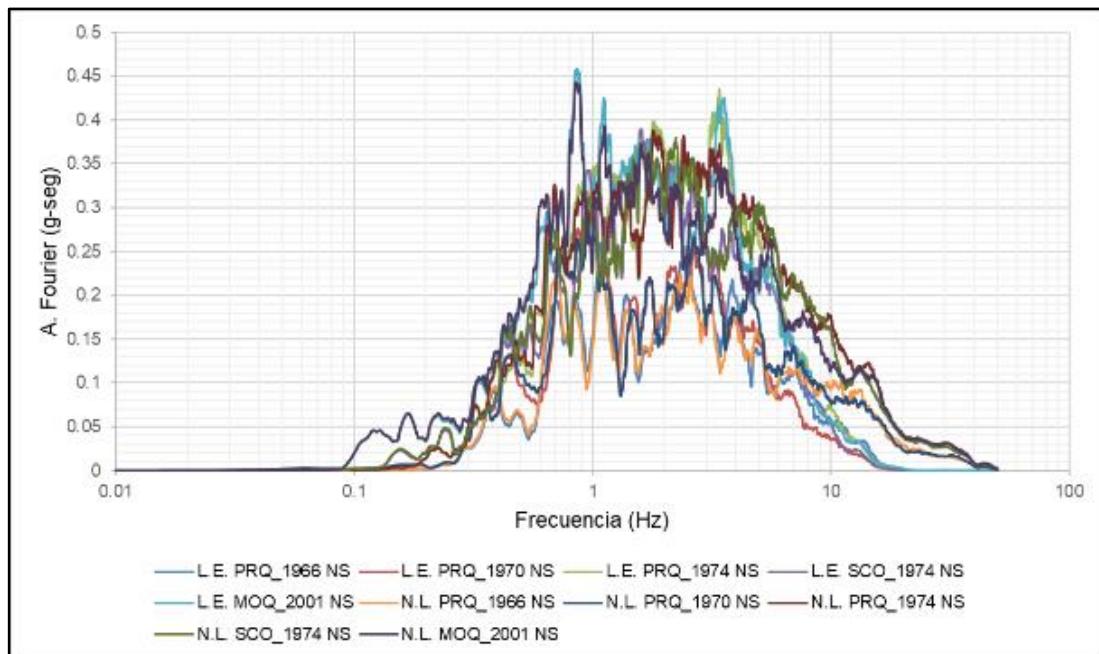
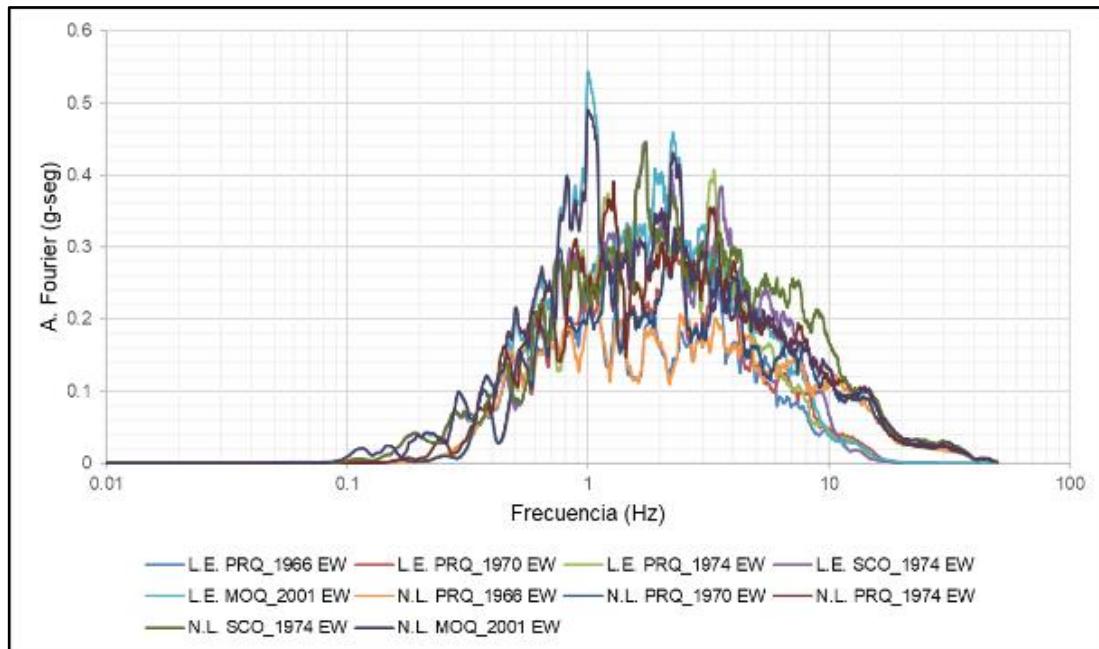
PERFIL AM-03 SM

ESPECTROS DE RESPUESTA:



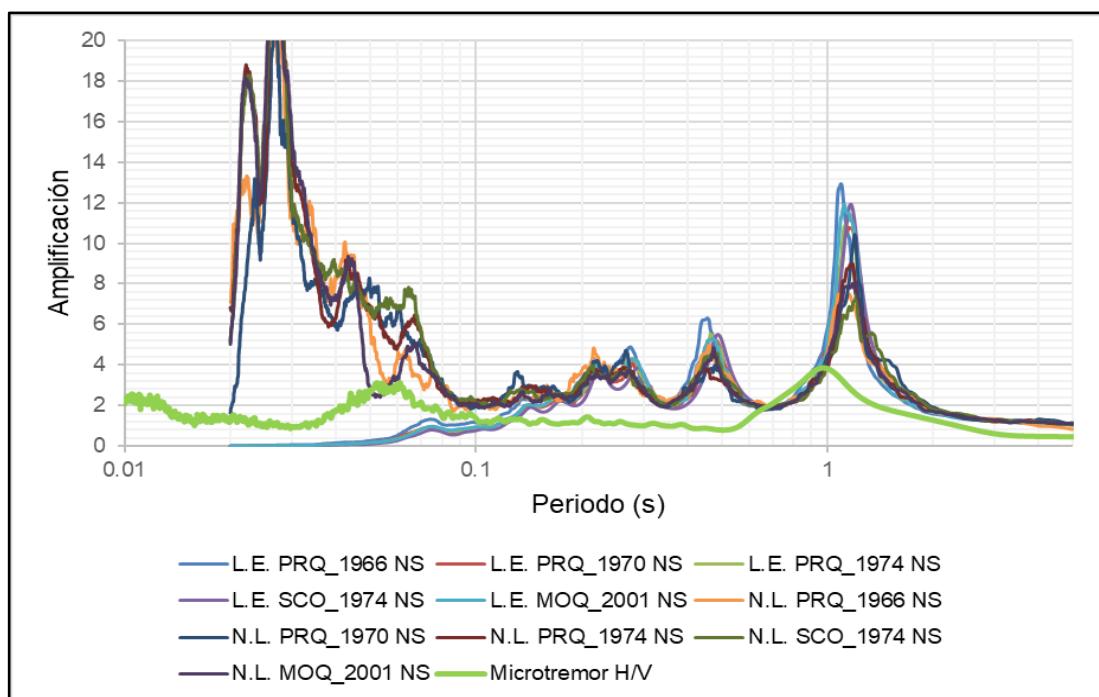
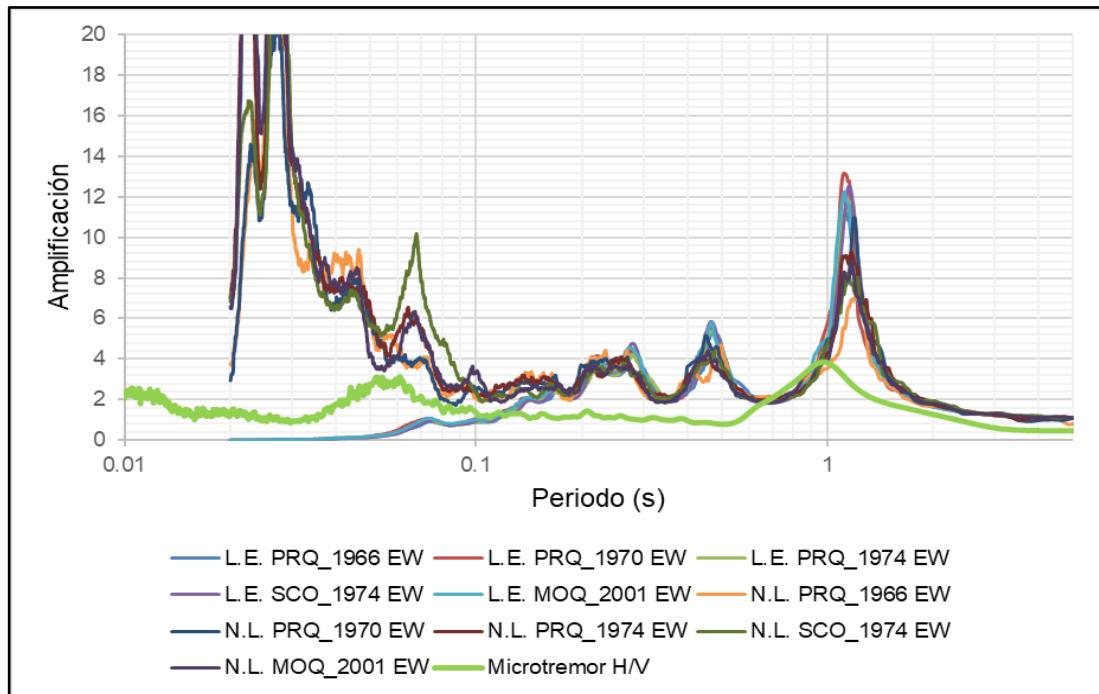
PERFIL AM-05 SM

ESPECTRO DE FOURIER EN LA SUPERFICIE:



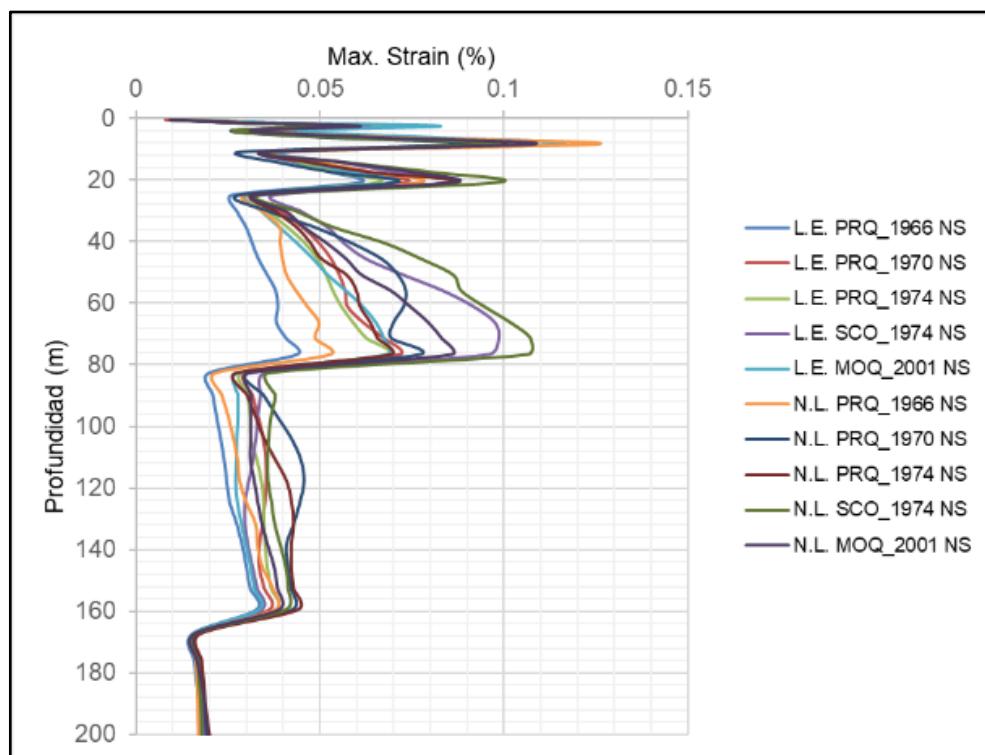
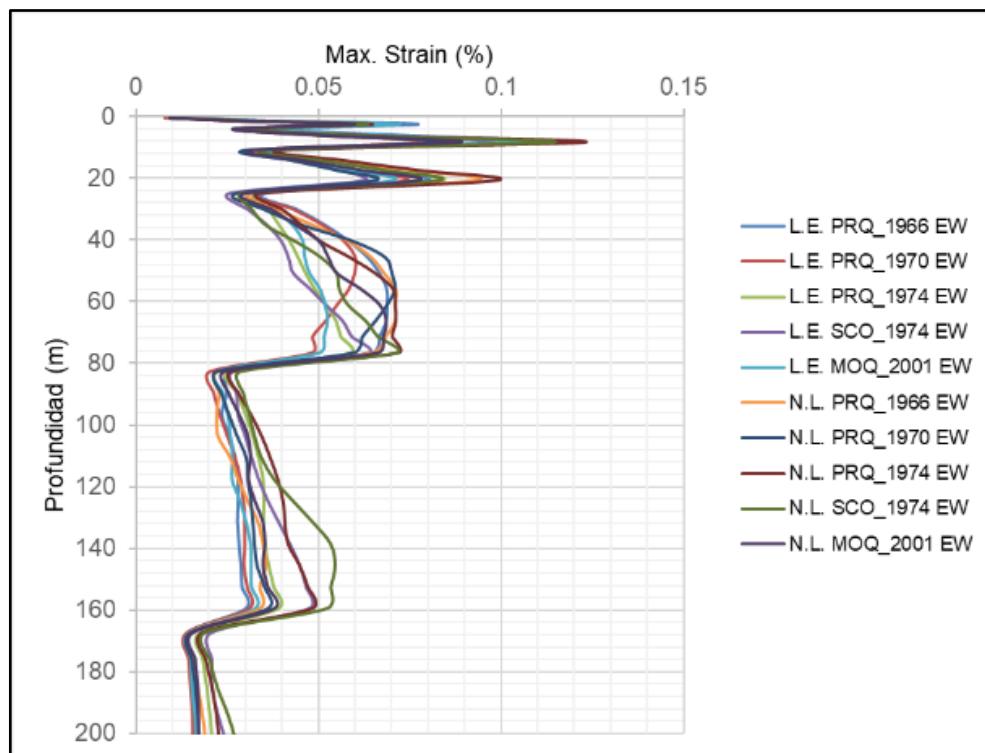
PERFIL AM-05 SM

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA:



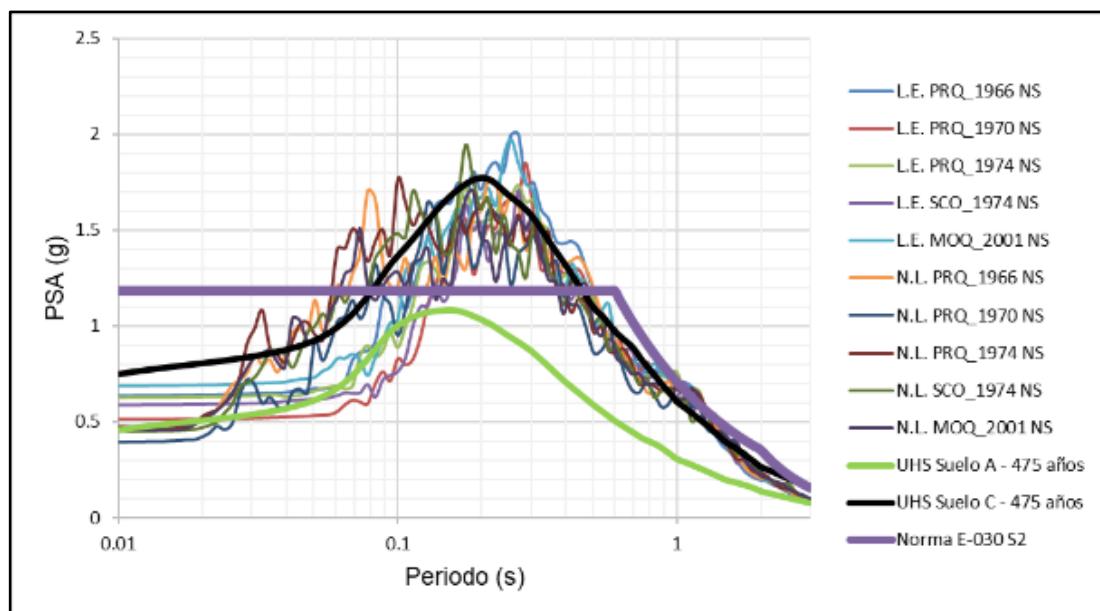
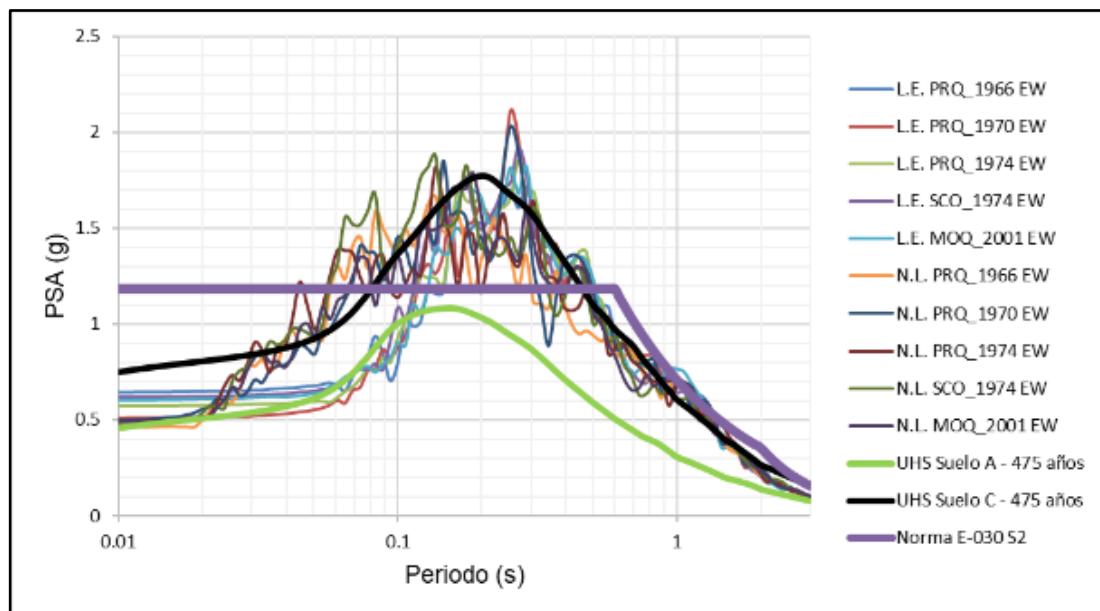
PERFIL AM-05 SM

PERFIL DE DEFORMACIONES MÁXIMAS:



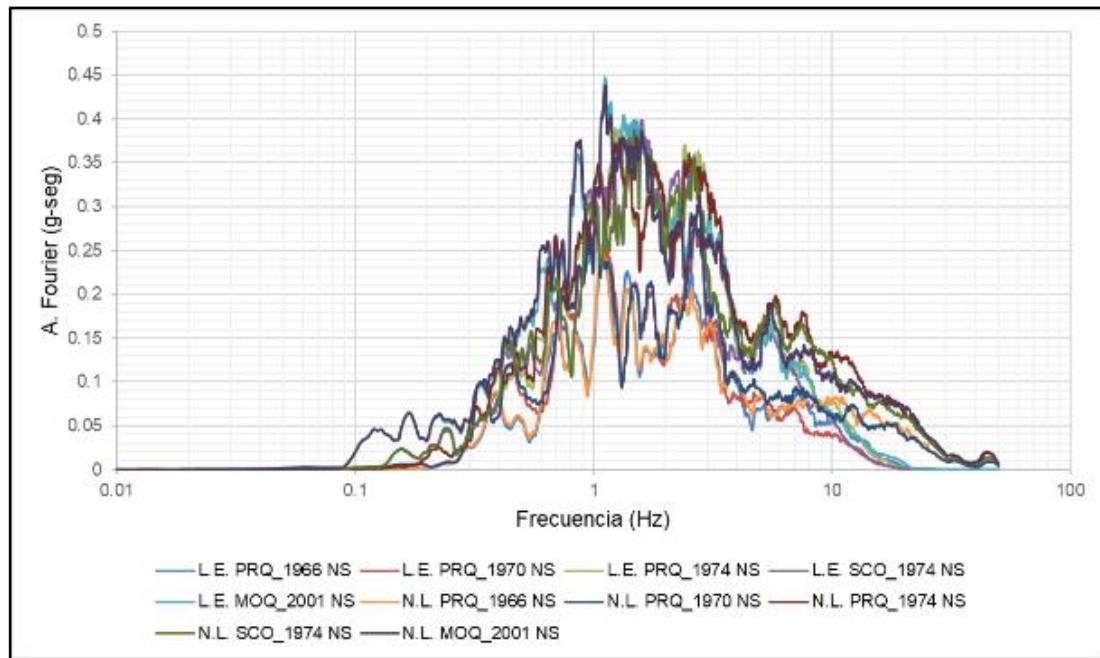
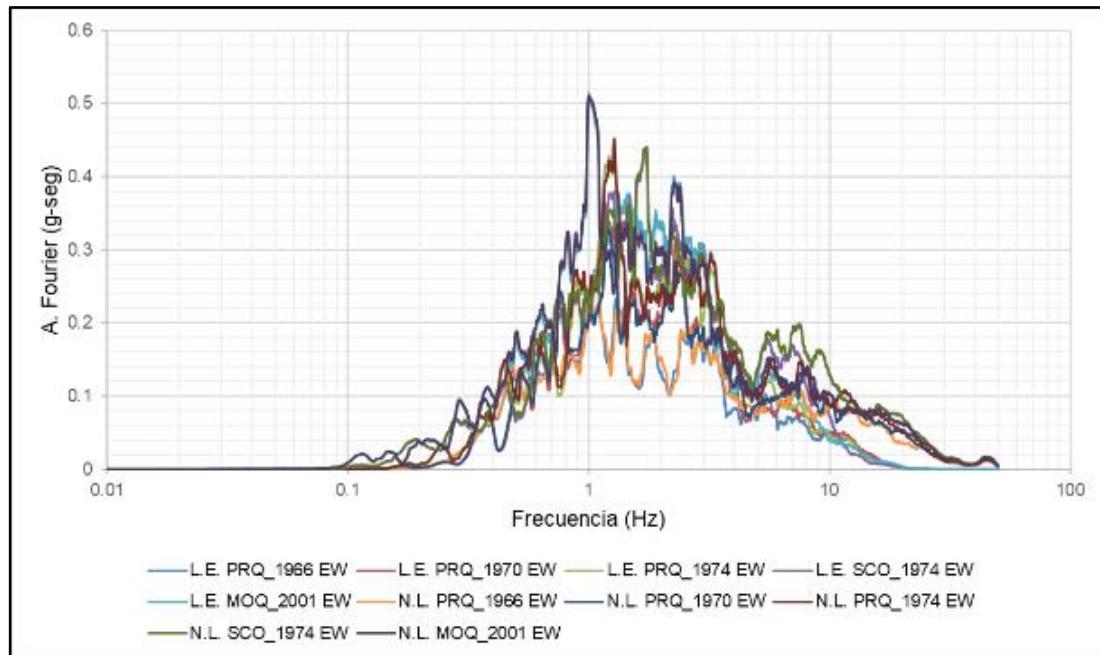
PERFIL AM-05 SM

ESPECTROS DE RESPUESTA:



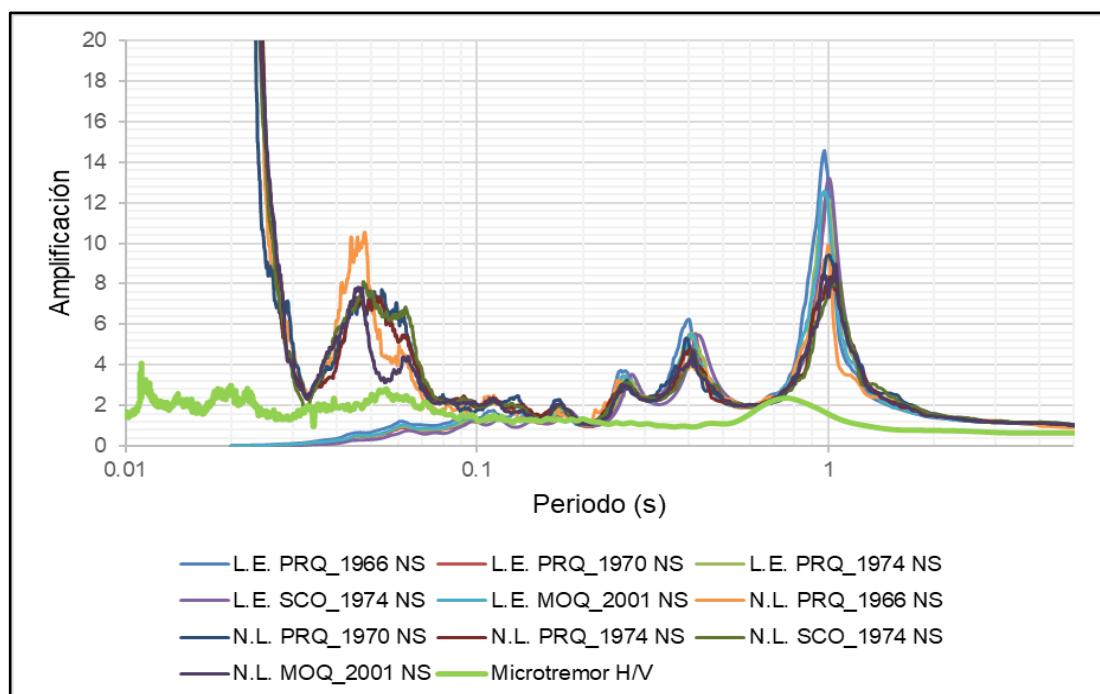
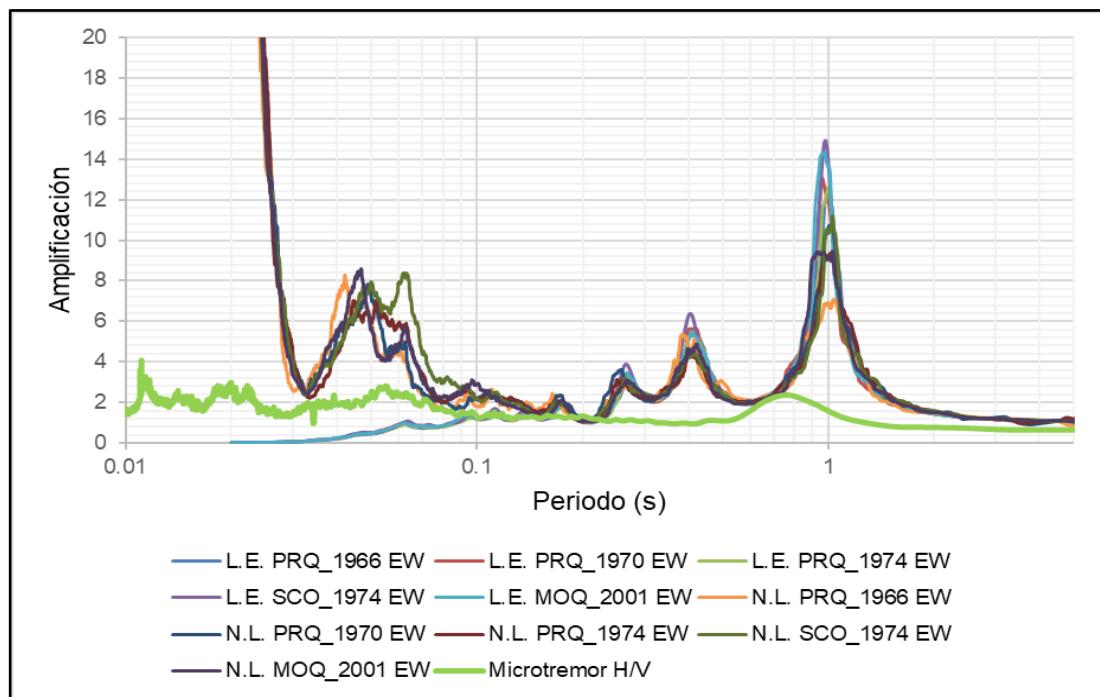
PERFIL AM-06 SM

ESPECTRO DE FOURIER EN LA SUPERFICIE:



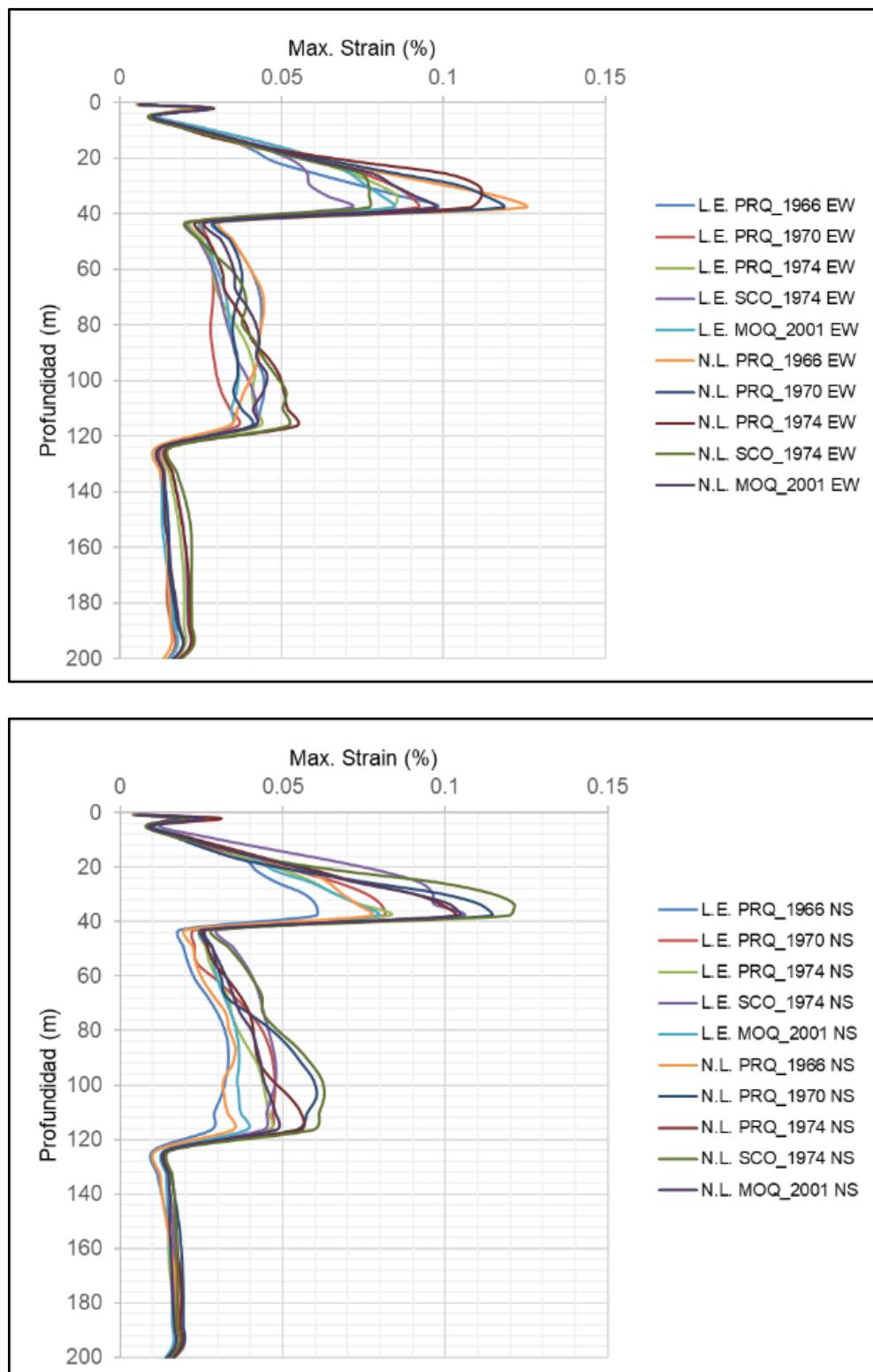
PERFIL AM-06 SM

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA:



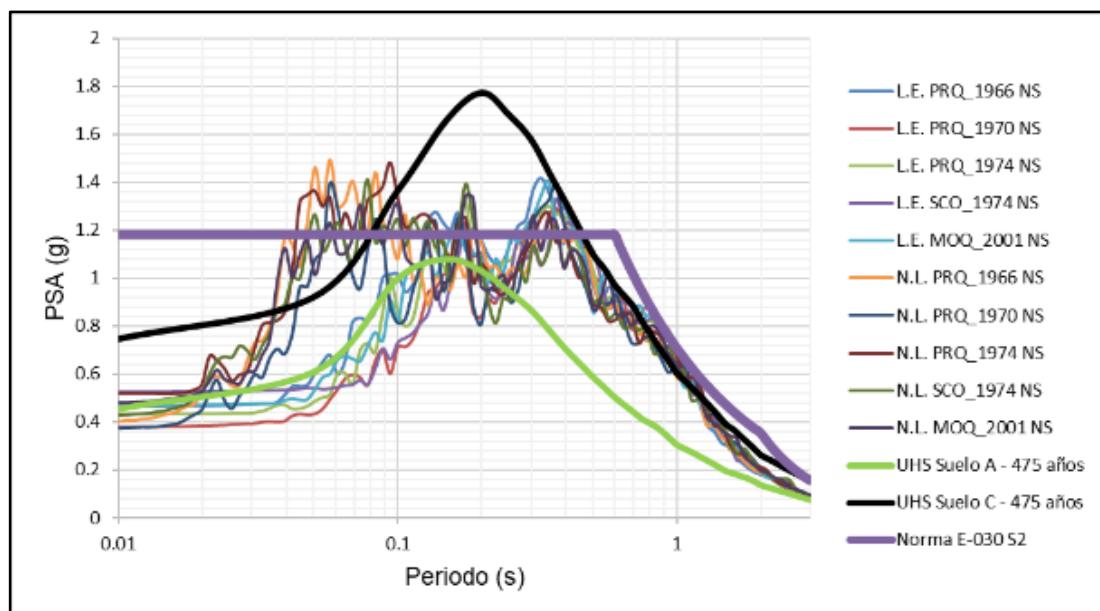
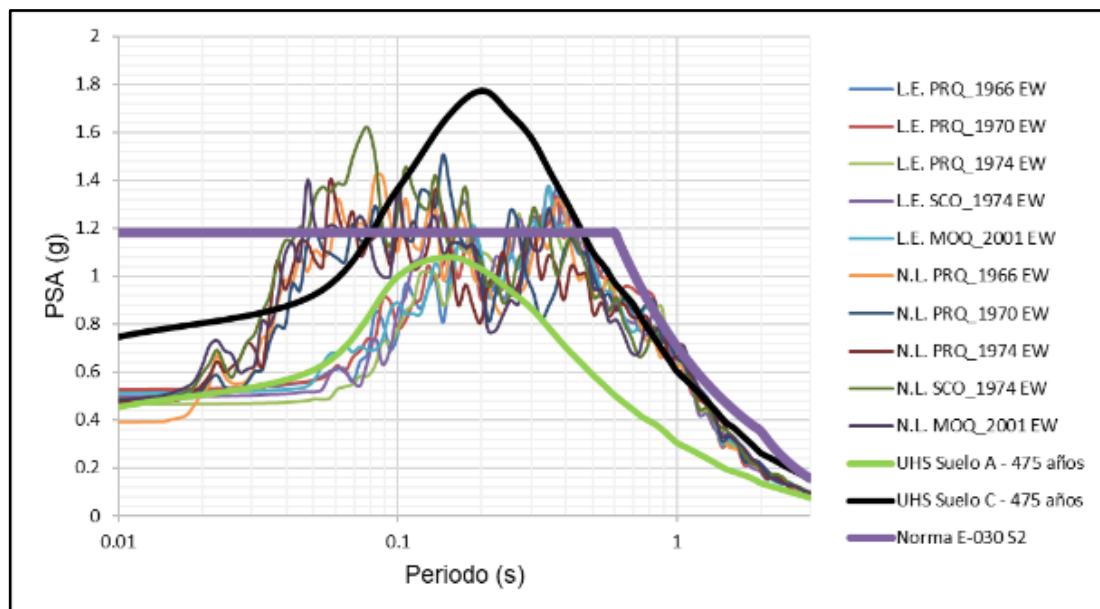
PERFIL AM-06 SM

PERFIL DE DEFORMACIONES MÁXIMAS:

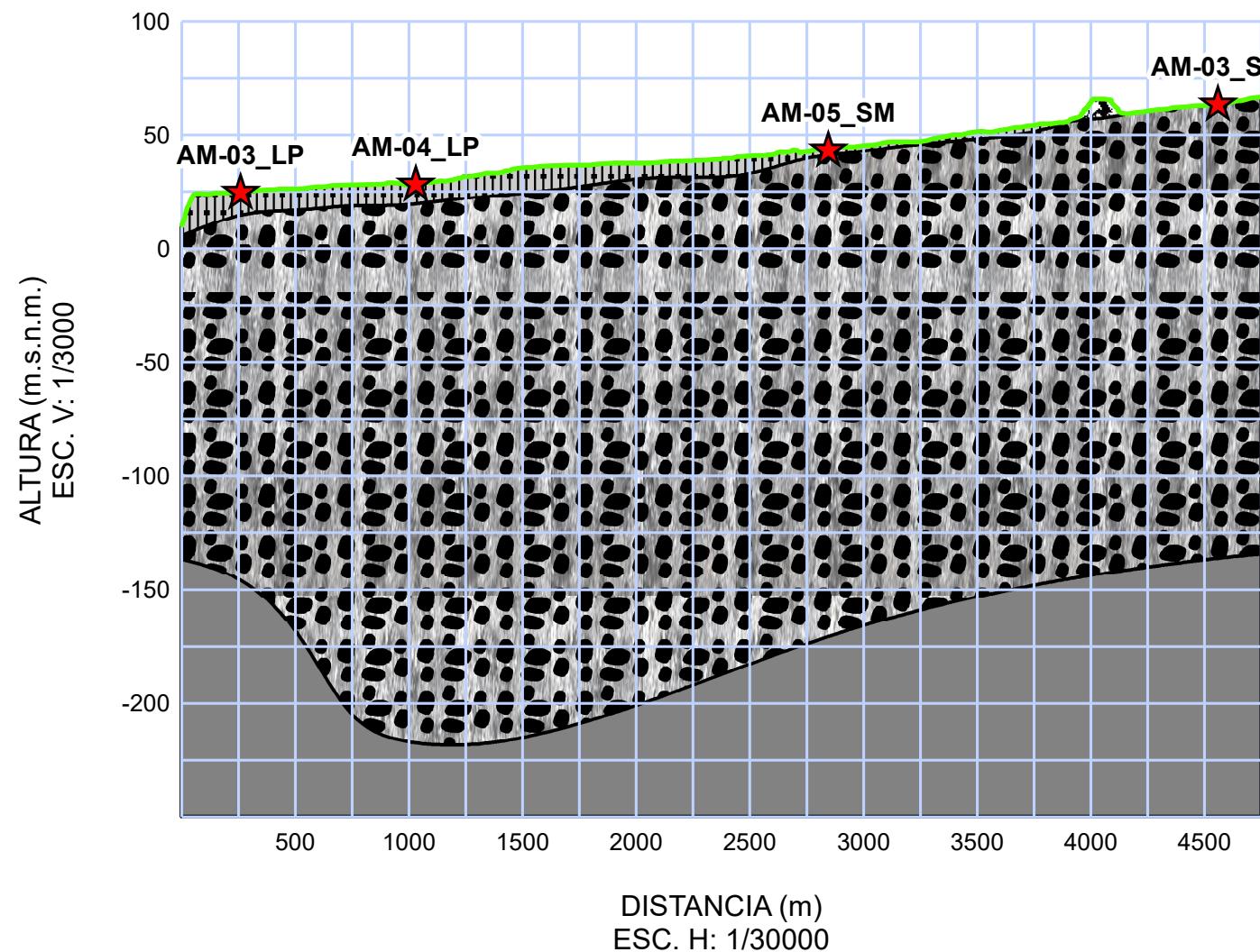


PERFIL AM-06 SM

ESPECTROS DE RESPUESTA:



SECCIÓN A-A'



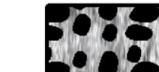
LEYENDA



Material antropogénico



Material compuesto por arenas y finos.



Conglomerado de Lima compuesto principalmente por graval mal gradada.

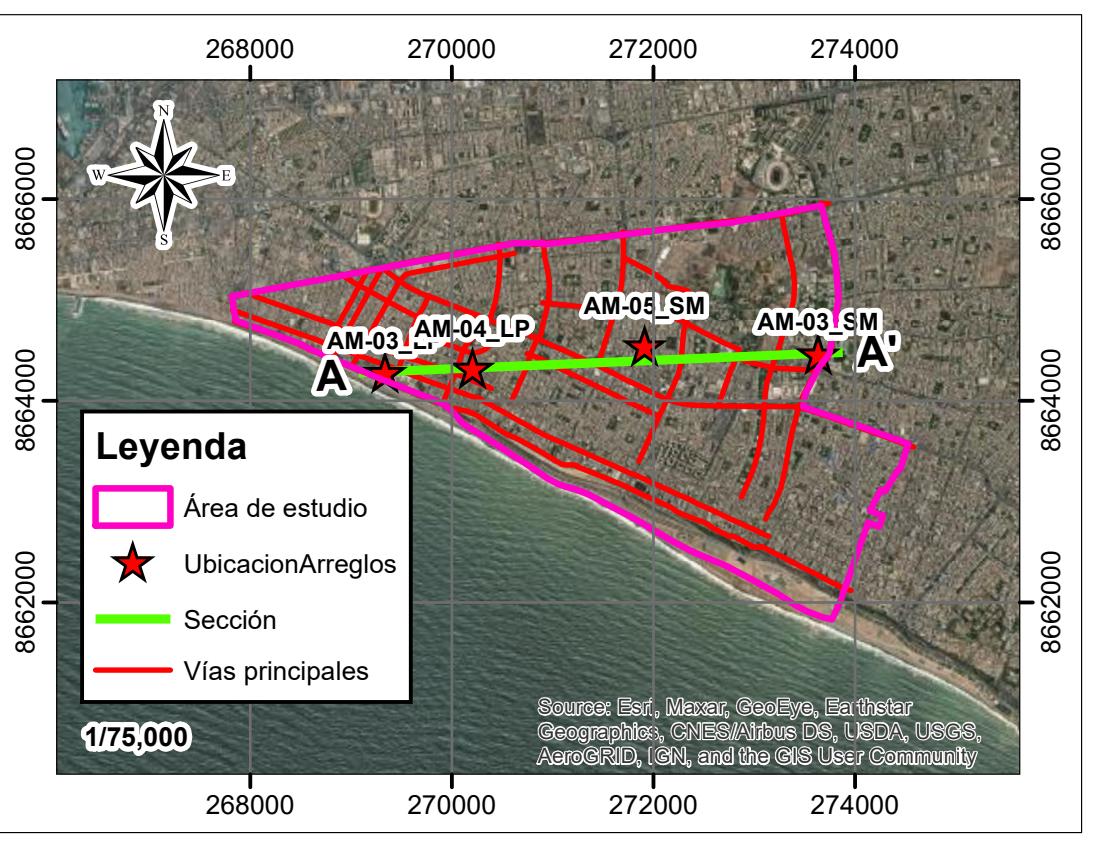


Roca sísmica con $V_s > 1500$ m/s.

Simbología



Arreglos de microtremores



	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL		
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LOS DISTRITOS DE LA PERLA Y SAN MIGUEL			
PERFIL DE SUELO			INFORMACIÓN DEL PROYECTO
Provincia: LIMA			Departamento: LIMA
Tesis: BACH. GERSON CARRASCO DÍAZ			Asesora: DRA. DIANA CALDERÓN CAHUANA
Coasesor: DR. CARLOS GONZALES TRUJILLO			ANEXO E-4
Escala: Indicada	Año: 2021	Proyección: UTM	Datum: WGS84
Zona: ZONA 18 SUR			

MAPAS

