

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



TESIS

**ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y
AMPLIFICACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS EN LOS SUELOS DEL
DISTRITO DE COMAS**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

**ELABORADO POR
ANGELA MARIBEL VALDEZ NEYRA**

ID: 0009-0002-4263-8881

**ASESOR
PhD. DIANA LUCIA CALDERÓN CAHUANA**

ID: 0000-0001-6007-9177

LIMA – PERÚ

2025

© 2025, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o parte, con fines estrictamente académicos”.

Valdez Neyra, Angela Maribel

avaldezn@uni.pe

Telf.: 993-577-709

DEDICATORIA:

A mis padres, Ernan y Dora, quienes me apoyaron incondicionalmente y cuyo ejemplo de superación siempre será mi motivo para salir adelante.

A mis abuelitos, tíos y a mi hermano Jose Carlos por el apoyo que me brindaron.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres que siempre me apoyaron, motivaron e inculcaron valores, por lo que les estaré eternamente agradecida. A mi hermano, mis abuelitos y mis tíos, que siempre me alentaron a continuar con mis metas trazadas.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería. Para mí es un orgullo pertenecer a la mejor Facultad de Ingeniería Civil del Perú.

Al Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), por todas las facilidades en la realización de la presente investigación.

A la Dra. Diana Calderón y al Dr. Carlos Gonzáles, mi asesor y mi co-asesor de tesis, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a sus capacidades, conocimientos y experiencias que contribuyen con mi formación profesional; así como también haberme tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante el desarrollo de la tesis.

Al Dr. Zenon Aguilar, Msc. Fernando Lázares, por compartir sus conocimientos desinteresadamente que me ayudaron en la realización de mi tesis. A la Ing. Silvia Alarcón por todo el apoyo que me brindó para la realización de mi tesis.

A mis compañeros y amigos presentes y pasados del CISMID, que sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas.

A todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron a la realización de la presente tesis.

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	4
Abstract.....	6
Prólogo.....	8
Lista de Tablas.....	9
Lista de Figuras	11
Lista de Símbolos y Siglas.....	16
Capítulo I: Introducción.....	17
1.1 Generalidades	17
1.2 Descripción del Problema de Investigación	17
1.3 Objetivos del Estudio.....	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.2 Objetivos Específicos.....	19
1.4 Antecedentes Investigativos.....	19
1.5 Formulación de la Hipótesis.....	20
1.6 Organización de la Tesis.....	20
1.7 Aspectos Generales.....	21
1.7.1 Ubicación.....	21
1.7.2 Población.....	21
Capítulo II: Marco Teórico y Conceptual.....	23
2.1 Marco Teórico.....	23
2.1.1 Origen de los Terremotos	23
2.1.2 Ondas Sísmicas	25
2.1.3 Parámetros de Localización y Tamaño.....	26
2.1.4 Transmisión de Ondas Sísmicas	27
2.1.5 Aceleración: Parámetro de Diseño	27
2.2 Marco Conceptual	29
2.2.1 Evaluación de Peligro Sísmico	29
2.2.2 Caracterización Geológica.....	30
2.2.3 Caracterización Geotécnica.....	33
2.2.4 Caracterización Dinámica	37
2.2.5 Red Acelerográfica	47
2.2.6 Análisis de Amplificación Sísmica.....	49
2.2.7 Microzonificación Sísmica	56
Capítulo III: Peligro Geológico y Caracterización Geotécnica.....	57
3.1 Introducción.....	57
3.2 Caracterización Geológica.....	57
3.2.1 Aspectos Geomorfológicos	58
3.2.2 Aspectos Geológicos y Litológicos.....	60
3.2.3 Marco Hidrogeológico.....	62
3.2.4 Procesos Geodinámicos Externos	64
3.2.5 Análisis de Pendientes	64
3.3 Mapa de Peligros Geológicos	68
3.3.1 Peligro Muy Alto	68
3.3.2 Peligro Alto	69
3.3.3 Peligro Medio	70

3.3.4	Peligro Bajo	70
3.4	Caracterización Geotécnica.....	71
3.4.1	Información Recopilada.....	71
3.4.2	Ataque Químico por Suelos y Aguas Subterráneas al Concreto de Cimentaciones.....	74
3.4.3	Identificación de Suelos.....	77
3.4.4	Análisis de Capacidad de Carga del Suelo	79
3.5	Microzonificación Geotécnica	81
3.5.1	Zona I.....	82
3.5.2	Zona II	82
3.5.3	Zona III	82
3.5.4	Zona IV.....	82
Capítulo IV: Caracterización Dinámica.....		84
4.1	Introducción.....	84
4.2	Información Recopilada	84
4.3	Ensayos Ejecutados	88
4.3.1	Medición Puntual de Microtremores.....	88
4.3.2	Ensayo MASW	89
4.3.3	Ensayo Refracción Sísmica	92
4.3.4	Ensayo Arreglo de Microtremores.....	93
4.4	Determinación del Periodo de Vibración del Suelo.	94
4.5	Determinación del Perfil de Velocidades de Ondas de Corte.....	96
4.5.1	Ensayo MASW	96
4.5.2	Arreglos de Microtremores.....	98
4.6	Determinación del Perfil de Velocidades de Ondas de Compresión ..	101
4.7	Mapas de Vs30	104
4.8	Mapas de Zonas de Isoperiodos.....	107
4.8.1	Zona I.....	107
4.8.2	Zona II	107
4.8.3	Zona III	108
4.8.4	Zona IV.....	108
Capítulo V: Evaluación de Peligro Sísmico Probabilístico		111
5.1	Introducción.....	111
5.2	Generalidades	111
5.2.1	Antecedentes	111
5.2.2	Alcances.....	112
5.3	Fuentes Sísmicas	112
5.4	Parámetros de Recurrencia Sísmica	114
5.5	Ecuaciones de Predicción de Movimiento (GMPE).....	114
5.5.1	Ecuación de Atenuación de Young (1997).....	116
5.5.2	Ecuación de Atenuación Abrahamson (2016).....	116
5.5.3	Ecuación de Atenuación Zhao (2016).....	117
5.5.4	Ecuación de Atenuación Sadigh (1997).....	118
5.5.5	Ecuación de Atenuación Chiou y Young (2014).....	119
5.5.6	Ecuación de Atenuación Abrahamson y Silva (2014).....	119
5.5.7	Ecuación de Atenuación Campbell y Bozorgnia (2014)	120
5.6	Determinación del Peligro Sísmico	121
5.7	Espectro de Peligro Uniforme	125
5.7.1	EPU en Roca.....	126
5.8	Análisis de Resultados	127

Capítulo VI: Microzonificación y Amplificación Sísmica	131
6.1	Introducción..... 131
6.2	Estaciones Acelerográficas..... 131
6.3	Amplificación Sísmica..... 133
6.3.1	Registros Sísmicos Empleados 133
6.3.2	Acelerogramas Sintéticos 134
6.3.3	Análisis de Respuesta de Sitio Unidimensional 136
6.3.4	Espectro de Respuesta Superficie..... 143
6.3.5	Perfil de Aceleraciones, Deformaciones y Desplazamientos..... 144
6.3.6	Comparación de Espectros de Aceleraciones 146
6.4	Microzonificación Sísmica 149
6.4.1	Zona I 149
6.4.2	Zona II 150
6.4.3	Zona III 150
6.4.4	Zona IV..... 151
Conclusiones	153
Recomendaciones	159
Referencias Bibliográficas	161
Anexos	180

RESUMEN

Perú está ubicado en la parte central oeste de Sur América en un área que pertenece al Cinturón de Fuego del Pacífico, donde la actividad sísmica mundial está concentrada. Durante los últimos sesenta años, Lima, la capital de Perú, ha experimentado un proceso migratorio errático que derivó en la invasión de áreas anteriormente despobladas, como las estribaciones andinas en las afueras del centro histórico. Es en este contexto que se estableció el distrito de Comas, en la zona norte de Lima; primero, por un número muy reducido de familias que, en la actualidad, se ha convertido en uno de los distritos más poblados del área metropolitana. Por esta razón, es necesario desarrollar y aplicar metodologías eficientes que permitan la identificación de áreas con alto riesgo sísmico por sus particulares condiciones de suelo y su comportamiento dinámico. Lo anterior cobra relevancia desde el último terremoto que afectó considerablemente a Lima, en 1974, Comas ha sufrido cambios significativos en la configuración de sus áreas urbanas y población.

Además, las características geomorfológicas de Comas están determinadas por el abanico aluvial del río Chillón y el piedemonte andino. Así, el distrito está cubierto principalmente por materiales rígidos como cantos rodados con matriz arenosa, típicamente conocido como el conglomerado, y depósitos de arena de densidad media. En el año 2010, el CISMID desarrolló el primer mapa de microzonificación sísmica para Comas, basado en la información de pozos de suelo, pozos de agua y mediciones de microtemores puntuales. En este mapa, se clasificaron los depósitos de suelos en función de su comportamiento mecánico, además se identificaron áreas con niveles freáticos altos y fluctuantes y zonas propensas a deslizamientos y desprendimientos de rocas.

Posterior a este estudio del CISMID, se realizaron ensayos geofísicos para proyectos privados en el distrito de Comas. Estos ensayos complementan los cálculos de las funciones de transferencia empíricas proporcionados por la relación espectral H/V de las vibraciones ambientales y las estimaciones de los perfiles de velocidad de las ondas de corte. Este conjunto de pruebas hizo evidentes valores considerables de amplificación relativa en el rango de 0,40 s a 0,60 s, en contraste con los valores del período fundamental original definidos en la vecindad de 0,10 s.

Dado la aparición de estos nuevos hallazgos, ese consideró necesario la actualización del mapa de microzonificación del distrito de Comas, teniendo en cuenta que los resultados correspondientes al rango de períodos más largos podrían estar relacionados con la influencia de la relación de impedancia de la subestructura de suelo profundo, que no fue analizada anteriormente y que tiene un fuerte impacto en su comportamiento dinámico. Para ello, en esta investigación, se realizaron extensivamente pruebas de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y mediciones de Arreglo de Microtremores de gran tamaño en el distrito, con el objetivo de evaluar la diferencia en la respuesta sísmica considerando tanto la estratigrafía del suelo superficial y de la profunda y, por lo tanto, recomendar revisiones en la clasificación de su sitio. Además, se realizó un análisis unidimensional de los perfiles característicos del suelo dado que en el distrito se encuentra instalada una estación sísmica perteneciente a la red sísmica CISMID (REDACIS).

Luego de procesar los ensayos geofísicos complementarios, se integró la información de los estudios recopilados y ejecutados. Se identificó el desarrollo de dos picos de periodos en la zona llana del distrito, lo que indicaría cambios abruptos en el espesor del suelo. El periodo fundamental del suelo puede aumentar o viceversa dependiendo de la profundidad del depósito analizado. El distrito cuenta suelos rígidos en la ladera de los cerros y suelos flexibles en la zona llana. El promedio de velocidades de ondas de corte, hasta 30 m de profundidad, sectoriza la zona de estudio en dos de acuerdo a la Norma Peruana: S1–Roca o suelo muy Rígido en la ladera de los cerros donde se ubica uno de los acelerógrafos del distrito; S2–Suelo Intermedio para el resto del distrito. Los perfiles sísmicos de gran profundidad obtenida de los Arreglos de Microtremores permitieron realizar el análisis de amplificación sísmica unidimensional hasta el basamento Rocoso (Suelo Tipo B–IBC). El mapa de microzonificación sísmica permite realizar la caracterización de la amenaza sísmica del distrito de Comas, se elabora de manera multidisciplinaria considerando la siguiente información: Mapa de Peligro Geológicos, Mapa de Microzonificación Geotécnica, Mapa de Vs30, Mapa de Isoperiodos, Análisis de Peligro Sísmico Probabilístico y Amplificación Sísmica de Perfiles Profundos.

ABSTRACT

Peru is located in the west-central part of South America in an area that belongs to the Pacific Ring of Fire, where global seismic activity is concentrated. Over the past sixty years, Lima, the capital of Peru, has experienced an erratic migration process that resulted in the invasion of previously unpopulated areas, such as the Andean foothills on the outskirts of the historic center. It is in this context that the district of Comas, in the northern area of Lima, was established; first, by a very small number of families that, currently, has become one of the most populated districts in the metropolitan area. For this reason, it is necessary to develop and apply efficient methodologies that allow the identification of areas with high seismic risk due to their particular soil conditions and dynamic behavior. The above becomes relevant since the last earthquake that considerably affected Lima, in 1974, Comas has suffered significant changes in the configuration of its urban areas and population.

Furthermore, the geomorphological characteristics of Comas are determined by the alluvial fan of the Chillón River and the Andean foothills. Thus, the district is mainly covered by rigid materials such as pebbles with a sandy matrix, typically known as conglomerate, and medium–density sand deposits. In 2010, CISMID developed the first seismic microzonation map for Comas, based on information from soil wells, water wells and point microtremor measurements. In this map, soil deposits were classified based on their mechanical behavior, and areas with high and fluctuating water tables and areas prone to landslides and rockfalls were also identified.

After this CISMID study, geophysical tests were carried out for private projects in the Comas district. These tests complement the empirical transfer function calculations provided by the H/V spectral ratio of ambient vibrations and estimates of shear wave velocity profiles. This set of tests made evident considerable values of relative amplification in the range of 0,40 s to 0,60 s, in contrast to the original fundamental period values defined in the vicinity of 0,10 s.

Given the appearance of these new findings, it was considered necessary to update the microzoning map of the Comas district, taking into account that the results corresponding to the range of longer periods could be related to the influence of the impedance relationship of the substructure of deep soil, which was

not previously analyzed and which has a strong impact on its dynamic behavior. For this, in this research, Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) tests and large Microtremor Array measurements were carried out extensively in the district, with the objective of evaluating the difference in the seismic response considering both the stratigraphy of the surface soil and the deep, and therefore, recommend revisions in your site's ranking. In addition, a one-dimensional analysis of the characteristic soil profiles was carried out given that a seismic station belonging to the CISMID (REDACIS) seismic network is installed in the district.

After processing the complementary geophysical tests, the information from the studies collected and executed was integrated. The development of two period peaks was identified in the flat area of the district, which would indicate abrupt changes in the thickness of the soil. The fundamental period of the soil may increase or vice versa depending on the depth of the analyzed deposit. The district has rigid soils on the slopes of the hills and flexible soils in the flat area. The average speed of shear waves, up to 30 m deep, sectors the study area into two according to the Peruvian Standard: S1–Rock or very Rigid soil on the slope of the hills where one of the district's accelerometers is located; S2–Intermediate Land for the rest of the district. The deep seismic profiles obtained from the Microtremores Arrays allowed the one–dimensional seismic amplification analysis to be carried out down to the rock basement (B–IBC Soil Type). The seismic microzonation map allows the characterization of the seismic hazard of the Comas district. It is prepared in a multidisciplinary manner considering the following information: Geological Hazard Map, Geotechnical Microzoning Map, Vs30 Map, Isoperiod Map, Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Seismic Amplification of Deep Profiles.

PRÓLOGO

El estudio de la Microzonificación Sísmica del distrito de Comas se realizó en el año 2010, aunque durante el año 2003 al 2005 se había hecho una primera evaluación. En su momento, se recopiló información de las especialidades geología, geotecnia, dinámica del suelo y peligro sísmico, se realizaron algunos ensayos y se elaboró un mapa de microzonificación sísmica. Este mapa de Microzonificación Sísmica resultó ser una herramienta muy útil para la planificación del desarrollo urbano y la gestión de riesgos de desastres debido al dinamismo ocupacional. Sin embargo, dado que el distrito de Comas se encuentra en proceso de desarrollo urbano, a nivel demográfico y comercial, es necesario actualizar la propuesta inicial empleando ensayos y estudios complementarios.

En esta tesis, Angela Valdez Neyra, ha desarrollado los estudios complementarios de Medición Puntual de Microtremores, MASW, Refracción Sísmica y Arreglo de Microtremores, logrando identificar un comportamiento singular en los depósitos del suelo del distrito. Asimismo, recopiló información como zonas vulnerables al Fenómeno del Niño, la carta geológica propuesta en el año 2021, investigaciones desarrolladas en la zona de estudio y la información de ensayos de geotecnia y dinámica de suelos ejecutados hasta la fecha.

Por los motivos antes mencionados, considero que la investigación realizada ha proporcionado resultados importantes, pudiendo servir de base para el ordenamiento territorial del distrito y el diseño sísmico de las estructuras.

Asesor

LISTA DE TABLAS

Tabla N°1: Escala de Intensidad de Mercalli Modificada.....	26
Tabla N°2: Principales terremotos.	28
Tabla N°3: Tipos de Análisis Cuantitativos de Peligros.....	32
Tabla N°4: Valores de la relación de Poisson con respecto al tipo de suelo.	36
Tabla N°5: Valores de Modulo de Elasticidad con respecto al tipo de suelo.	36
Tabla N°6: Valores de Factor de Forma en función de la Zapata.....	37
Tabla N°7: Clasificación de los Perfiles de Suelo.....	38
Tabla N°8: Correlación de Velocidad de onda P en diferentes tipos de suelo y roca.....	40
Tabla N°9: Correlación de Velocidad de onda S y tipo de suelo (saturado).	40
Tabla N°10: Formulación para el cálculo de espesores de depósitos sedimentarios.....	41
Tabla N°11: Resumen de Acelerográficos Instalados	47
Tabla N°12: Valores Promedios Recomendados.....	55
Tabla N°13: Inventario de Peligros Geológicos.....	65
Tabla N°14: Resumen de Información Recopilada Calicatas	71
Tabla N°15: Lista de Ensayos Estándar Recopilado	73
Tabla N°16: Lista de Ensayos Especiales Recopilados	74
Tabla N°17: Grado de agresividad de pH	75
Tabla N°18: Elementos Químicos Nocivos para la Cimentación	75
Tabla N°19: Requisitos para Concreto Expuesto a Soluciones con Sulfatos.....	76
Tabla N°20: Parámetros considerados para el análisis de Capacidad de Carga del Suelo.	79
Tabla N°21: Carga admisible de carga utilizando metodología de Terzaghi, y Terzaghi Modificado para Falla General y Local.....	80
Tabla N°22: Asentamiento Elástico para cimientos corridos.	81
Tabla N°23: Equipo Empleado para la Medición Puntual de Microtemores.....	88
Tabla N°24: Equipo Empleado para el Ensayo MASW y Refracción Sísmica	89
Tabla N°25: Límites de búsqueda y resultados obtenido de la inversión para el perfil de velocidades.....	99
Tabla N°26: Aplicación de formulaciones empíricas para el cálculo de espesores de depósitos sedimentarios de diversos investigadores.	100
Tabla N°27: Parámetros Dinámicos de los Ensayos Geofísicos Ejecutados.	103

Tabla N°28: Parámetros calculados de los Perfiles de Velocidades de Ondas de Corte, Ensayo MASW Ejecutados.....	105
Tabla N°29: Parámetros Sismológicos Empleados para las Fuentes Sismogénicas.....	114
Tabla N°30: Resumen de las características de las leyes de atenuación analizadas.....	115
Tabla N°31: Ponderación estimada para cada ley de atenuación para sismos de subducción Interfase por la de intraplaca	115
Tabla N°32: Fallas Cuaternarias del Mapa Neotectónico del Perú.....	122
Tabla N°33: Clasificación del Perfil del Suelo (TABLA 20.3-1 SITE CLASSIFICATION ASCE/SEI 7-05)	123
Tabla N°34: Peligro sísmico según la aceleración máxima del Suelo	128
Tabla N°35: Probabilidad de ocurrencia para un periodo de 50 años para un periodo de retorno (Tr)	128
Tabla N°36: Aceleraciones espectrales en Suelo Tipo B para diferentes periodos de retorno.....	128
Tabla N°37: Comparación de Aceleraciones espectrales obtenido para Suelo Tipo B para diferentes periodos de retorno.	130
Tabla N°38: Estaciones Acelerográficas de Aceleraciones Espectrales obtenido para Suelo Tipo C para diferentes periodos de retorno (Tr).....	131
Tabla N°39: Sismos Magnitud Significativa empleado para el Análisis de Amplificación Sísmica.	134
Tabla N°40: Parámetros de Registros Sísmicos Corregidos.	135
Tabla N°41: Parámetros de Registros Sísmicos Sintéticos.	135
Tabla N°42: Propiedades consideradas para en análisis de amplificación sísmica -A1.	138
Tabla N°43: Propiedades consideradas para en análisis de amplificación sísmica -A2.	139
Tabla N°44: Propiedades consideradas para en análisis de amplificación sísmica -A3.	141
Tabla N°45: Parámetros obtenido de la Función de Transferencia-A1.....	142
Tabla N°46: Parámetros obtenido de la Función de Transferencia-A2.....	142
Tabla N°47: Parámetros obtenido de la Función de Transferencia-A3.....	142

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1: Mapa de Ubicación del Distrito de Comas.....	22
Figura N° 2: Continentes y placas litosféricas.	23
Figura N° 3: Tipo de Sismos.	24
Figura N° 4: Deformaciones producidas por las Ondas de Cuerpo y Superficiales.....	26
Figura N° 5: Esquema de peligro sísmico probabilístico..	30
Figura N° 6: Mapa de Geología Regional del distrito de Comas..	31
Figura N° 7: Clasificación de Peligros originados por fenómenos naturales.....	32
Figura N° 8: Parámetros generales de evaluación para la identificación y caracterización de Peligros Generados por Fenómenos Naturales..	33
Figura N° 9: Análisis de la Capacidad de Carga de Terzaghi... ..	35
Figura N°10: Caracterización Dinámica – Correlación entre MASW y Refracción Sísmica.....	37
Figura N°11: Patrones de espectro H/V (a) pico claro, (b) múltiples picos o ancho (c) picos agudos y (d) picos planos.	43
Figura N°12: a) Espectros de número de onda de frecuencia (ciclos/m) de alta resolución frecuencia de 2Hz b) Aplicación.....	44
Figura N°13: Flujo de observación y análisis en el método SPAC para estimar perfil de velocidad de onda S.....	45
Figura N°14: Diagrama esquemático de la inversión conjunta no lineal utilizando tanto la curva de dispersión como el espectro H/V.....	46
Figura N°15: Acelerogramas registrados en Lima en el Sismo 2007 Pisco.....	47
Figura N°16: Acelerógrafo - Red Acelerográfica del CISMID-FIC-UNI.	48
Figura N°17: Espectro de respuesta para distintos periodos de frecuencia.....	48
Figura N°18: Espectro de Fourier del terremoto del 31/05/1970 Perú.	49
Figura N°19: Variación de amplitud de onda al propagarse por diferentes tipos de suelo.	50
Figura N°20: Procedimiento para la obtención de aceleraciones y velocidades..	51
Figura N°21: Curva histórica de esfuerzo-deformación y Curva G/Gmax vs γ . ..	52
Figura N°22: Curvas de G/Gmax y Amortiguamiento-Análisis de Sensibilidad Cu.	53

Figura N°23: Curvas de G/Gmax y Amortiguamiento-Análisis de Sensibilidad D ₅₀	53
Figura N°24: Variación del ángulo de fricción interna y cohesión de la grava con el incremento de la matriz fina.....	54
Figura N°25: Curvas de G/Gmax y Amortiguamiento, Comportamiento Elástico	55
Figura N°26: Efectos de ondas sísmicas en edificaciones.	56
Figura N°27: Mapa Geomorfológico.....	59
Figura N°28: Mapa Geológico.....	59
Figura N°29: Mapa Hidrogeológico del Distrito de Comas.	62
Figura N°30: Mapa de Ubicación de Pozos.	63
Figura N°31: Mapa de pendientes con el Inventario de Peligros Geológicos y Movimientos de Masa.	65
Figura N°32: (a) Sector La Cumbre. Chaperito (Asentamientos) (b) Remoción de material del cauce del Río Chillón – San Diego.....	67
Figura N°33: (a) Ubicación de Gallinazo (b) Puente peatonal inestable del sector Gallinazo.	67
Figura N°34: (a) Viviendas colapsadas e inhabilitadas debido a la erosión (b) Ladera protegida por una geomembrana y gaviones.....	67
Figura N°35: Mapa de Peligros Geológicos del distrito de Comas.	69
Figura N°36: Mapa de Ubicación de Calicatas Recopiladas.	72
Figura N°37: Mapa de Ubicación de Ensayo SPT, CP y Pozos Recopilados.....	72
Figura N°38: Mapa de Ubicación ensayos de elementos químicos y presencia de aguas subterráneas salinas y duras..	76
Figura N°39: Mapa de Tipo de Suelo a 1.00m de profundidad.....	78
Figura N°40: Mapa de Tipo de Suelo a 2.50m de profundidad.....	78
Figura N°41: Mapa de Microzonificación Geotécnica del Distrito de Comas.....	83
Figura N°42: Mapa de Ubicación de Ensayos Geofísicos Recopilados-MASW, Refracción Sísmica y Arreglo de Microtremores.....	85
Figura N°43: Mapa de Ubicación de Ensayos Geofísicos Recopilados-Medición Puntual de Microtremores..	85
Figura N°44: Perfiles de Velocidad de Onda de Corte Recopilados (a) MASWR- 01 al MASWR-7 (b) MASWR-08 al MASWR-11 (c) MASWR-12 al MASWR-15..	86

Figura N°45: Perfiles de Velocidad de Onda de Corte Recopilados (a) MASWR-16 al MASWR-25 (b) MASWR-26 al MASWR-34 (c) MASWR-35 al MASWR-38.....	86
Figura N°46: Perfiles de Velocidad de Onda de Corte Recopilados (a) MASWR-39 al MASWR-46 (b) AR-01 al AR-03.....	87
Figura N°47: Espectro H/V (a) claro, (b) múltiples o ancho (c) agudos y (d) planos..	87
Figura N°48: (a) Equipo de Medición de microtemores (b) Realización del Ensayo de Medición Puntual de Microtemores.....	88
Figura N°49: (a) Equipo de Ensayo MASW (b) Ejecución del Ensayo de Refracción Sísmica..	90
Figura N°50: Análisis ejecutado en mediciones de Ensayo MASW.....	90
Figura N°51: Mapa de Ubicación de Ensayos Geofísicos Ejecutados-Medición Puntual de Microtemores..	91
Figura N°52: Mapa de Ubicación de Ensayos Geofísicos Ejecutados-Ensayo MASW, Refracción Sísmica y Arreglo de Microtemores.....	91
Figura N°53: Análisis ejecutado en mediciones de Ensayo Refracción Sísmica	92
Figura N°54: Equipo empleado para la Ejecución de Arreglo de Microtemores (a) TOKYO (b) GEODAS – CISMID.	93
Figura N°55: Análisis ejecutado en mediciones de Ensayo de Arreglo de Microtemores..	94
Figura N°56: Mapa que muestra los periodos fundamentales obtenido de las curvas H/V de los microtemores recopilados y ejecutados.....	95
Figura N°57: Mapa que muestra los periodos identificados en segundo pico de amplificación de los microtemores recopilados y ejecutados.....	95
Figura N°58: Curva de Dispersión generada para el arreglo (a) A-01, (b) A-02 y (c) A-03..	99
Figura N°59: Comparación de Cocientes Espectrales de los Ensayos MASW Ejecutados con Medición de Microtemores cercanos.....	104
Figura N°60: Mapa de Vs30 de ensayos MASW recopilados y ejecutados.....	105
Figura N°61: Mapa Vs30 aplicando la Normativa ASCE..	106
Figura N°62: Mapa Vs30 aplicando la Normativa Peruana E0.30 Diseño Sismorresistente..	106
Figura N°63: Mapa de Isoperiodos considerando el periodo fundamental $\leq 0.2s$ para la zona baja del distrito.....	109

Figura N°64: Mapa de Isoperiodos considerando el periodo fundamental $>0.3s$ para la zona baja del distrito.....	110
Figura N°65: Fuentes Sismogénicas de Subducción y Continentales propuestas por SENCICO 2016.....	113
Figura N°66: Mapa de Sismicidad de Datos CMT (1976-2011, $M \geq 5$), (a) Profundidad (b) Mecanismo Focal ($0 < h < 350 \text{Km}$).	121
Figura N°67: Sección Vertical correspondiente al área evaluada.....	121
Figura N°68: Esquema de los Árbol Lógico Empleado para Roca..	122
Figura N°69: Mapa de Peligros Sísmico para Árbol Lógico para Roca para $T=PGA \ 3.0s$	124
Figura N°70: Desagregación Sísmica del Árbol Lógico para Roca de la coordenada -11.93° y -77.04°	124
Figura N°71: Espectro de Peligro Uniforme como envolvente de la respuesta sísmica.....	125
Figura N°72: Ubicación de los Espectros de Peligro Uniforme.....	126
Figura N°73: Espectro de Peligro Uniforme Roca (B) de la coordenada N°7 (-11.93° , -77.04°).....	126
Figura N°74: Espectro de Peligro Uniforme Normalizado Roca de la coordenada N°7.....	127
Figura N°75: Espectro de Peligro Uniformes distrito de Comas..	129
Figura N°76: Mapa de Ubicación de los Sismos utilizados para el Análisis de EPU Normalizado.....	132
Figura N°77: Espectro de Respuesta Normalizado de los sismos con $M > 3$ de las estaciones.....	132
Figura N°78: Espectro de Respuesta de registro sísmicos de las estaciones CISMID e IGP... ..	133
Figura N°79: Espectro de Respuesta de los Acelerogramas Corregidos y Sintéticos... ..	136
Figura N°80: Espectro de Respuesta Normalizado de los Acelerogramas Corregidos y Sintéticos.. ..	136
Figura N°81: Ensayos Geotécnicos y Geofísicos alrededor del Arreglo A-01... ..	137
Figura N°82: Ensayos Geotécnicos y Geofísicos alrededor del Arreglo A-02... ..	139
Figura N°83: Ensayos Geotécnicos y Geofísicos alrededor del Arreglo A-03... ..	140
Figura N°84: Función de Transferencia de los Perfiles de Suelo Profundo.....	141

Figura N°85: Amplificación de las Pseudoaceleraciones de respuesta para distintos sismos– A1.....	143
Figura N°86: Amplificación de las Pseudoaceleraciones de respuesta para distintos sismos– A2.....	143
Figura N°87: Amplificación de las Pseudoaceleraciones de respuesta para distintos sismos– A3.....	144
Figura N°88: Perfiles de aceleración, desplazamiento y deformación máximos – A1..	145
Figura N°89: Perfiles de aceleración, deformación y desplazamiento máximos – A2..	145
Figura N°90: Perfiles de aceleración, deformación y desplazamiento máximos – A3..	146
Figura N°91: Espectro de Respuesta y Normalizado del Arreglo A-01.....	147
Figura N°92: Espectro de Respuesta y Normalizado del Arreglo A-02.....	148
Figura N°93: Espectro de Respuesta y Normalizado del Arreglo A-03.....	148
Figura N°94: Aceleración Espectral Promedio de los Perfiles Profundos.....	148
Figura N°95: Mapa de Microzonificación Sísmica del Distrito de Comas.	152

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

ASTM	: American Society for Testing and Materials
CISMID	: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres
GMPE	: Ground-Motion Prediction Equation
GSHAP	: Global Seismic Hazard Assessment Program
IGP	: Instituto Geofísico del Perú
INGEMMET	: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
ISC	: International Seismological Center
MINAGRI	: Ministerio de Agricultura y Riego
M_w	: Magnitud Momento
NEHRP	: National Earthquake Hazards Reduction Program
NGA	: Next Generation Attenuation
NTP	: Norma Técnica Peruana
PGA	: Peak Ground Acceleration
RNE	: Reglamento Nacional de Edificaciones
SEDAPAL	: Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima
SIG	: Sistema de información Geográfica
SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
V_{s30}	: Velocidad promedio de ondas de corte hasta 30 metros de profundidad.
EPU	: Espectro de Peligro Uniforme.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

La microzonificación sísmica de ciudades en el ámbito mundial ha tomado gran fuerza, siendo la base fundamental para la formulación de normas sismo-resistentes y/o espectros de diseño. En países con regiones de alta actividad sísmica, es de vital importancia tomar dichos estudios como referencia para el adecuado planteamiento de los parámetros de diseño; así como para la determinación de posibles escenarios de daños durante sismos, a fin de evaluar correctamente los efectos sobre la infraestructura existente (Anbazhagan, 2013).

En general, en los estudios de microzonificación se ha encontrado que la respuesta sísmica local o efecto de sitio es el aspecto más importante a tomar en cuenta, ya que ante un evento sísmico el comportamiento del subsuelo de toda una ciudad no será homogéneo. La microzonificación sísmica generalmente ha sido reconocida como un componente importante dentro de la planificación urbana y la gestión de riesgos de desastres (Anbazhagan, 2013).

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Perú, debido a su posición dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico Sur, presenta condiciones geomorfológicas y geológicas que lo hacen propenso a la manifestación de diversos fenómenos naturales y que a su vez constituyen amenazas y/o peligros con consecuencias graves. Dicha situación se ha incrementado en las últimas décadas, debido principalmente a la ocupación informal del territorio, que incrementa la vulnerabilidad y contribuye a la generación de conflictos de uso en el territorio, facilitando la existencia de viviendas e infraestructura en zonas de alto peligro susceptibles a sismos, deslizamientos, huaycos, inundaciones y otros.

Comas es uno de los distritos de mayor extensión geográfica y poblacional del Cono Norte de Lima Metropolitana. Cuenta con 573,884 habitantes, según las estimaciones y proyecciones al año 2020 realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), lo que equivale al 25% de la población del Cono Norte y al 6% del total de Lima Metropolitana. El área ocupada actual del distrito es de 4872 Ha, donde el crecimiento mayor del área urbana ha sido sobre el

terreno agrícola. El uso actual predominantemente es residencial, con 73% para vivienda taller, 11.4% para uso agrícola, 2.7% para comercio y 2.1% para uso industrial (Municipalidad Distrital de Comas, 2017).

El primer alcalde de Comas promovió la invasión a la hacienda Pampa de Collique junto a otros que perdieron sus viviendas en el terremoto de 1966. Luego, en un periodo de dos años, nacieron las Cooperativas de Vivienda (Tacunán, 2014). Desde 1974 no se ha registrado sismos de magnitud considerable en Lima, por lo que se considera que nos encontramos en un período de silencio sísmico. Así, la probabilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud aumenta, con los consiguientes efectos devastadores tanto para la infraestructura como para la población.

En la actualidad, se cuenta con un estudio de microzonificación sísmica elaborado por el CISMID en el año 2010, el cual se basó en información geofísica y geotécnica ejecutada y recopilada de la época, donde se pudo dar registro de las áreas vulnerables, ya sea por sus características geológicas o geomorfológicas particulares. El Fenómeno del Niño del 2017 generó daños por el desborde del Río Chillón, identificando zonas vulnerables a la inundación fluvial en la zona de estudio. En el año 2018, la empresa ZER realizó un estudio de mediciones puntuales en el interior de un proyecto inmobiliario. Se pudo detectar una gran área potencialmente vulnerable, debido a las propiedades dinámicas obtenidas a través de diversos ensayos, lo cual requiere incluso estudios complementarios y, a su vez, definitivos. Así, y debido principalmente a la evolución de la demanda habitacional en el distrito de Comas, se requiere una actualización de dicha zonificación, adicionando la aplicación del análisis de ondas sísmicas. Mallma (2019) evaluó la influencia del deslizamiento de rocas en una topografía abrupta (cerros) calculando el recorrido máximo del deslizamiento en Comas. En el 2021, se actualiza la carta geológica 24-j del Boletín A 43 del INGEMMET (1992), el Boletín L 38 se genera en base a visitas de campo del 2017 (24j2 y 24j3) y 2018 (24j1 y 24j3), el cual incluye los cambios de estratigrafías, tipo de rocas, cartografía y geología estructural (2021).

De acuerdo a lo antes mencionado, se concluye que la aplicación del presente proyecto de investigación proporcionará información relevante para la población que habita dicho distrito y a la actualización de políticas de gestión de riesgo de desastres, necesarias debido a su dinamismo ocupacional. Reflejo de ello, son los

proyectos de los condominios en el área correspondiente al Aeródromo de Collique o el Centro Comercial Mall Plaza en Comas, que generarán un cambio drástico en las actividades humanas y de producción en el distrito en mención.

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.

1.3.1 Objetivo General.

- Definir el mapa de microzonificación sísmica considerando el análisis de ondas sísmicas y los diversos comportamientos mecánico-dinámico presentes en los depósitos de suelo de la zona de estudio para un adecuado diseño sismorresistente de edificaciones y obras de ingeniería.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Determinar el peligro geológico empleando información recopilada y la caracterización geotécnica mediante el análisis físico-mecánico de los materiales que conforman los depósitos de suelos del distrito.
- Caracterizar dinámicamente el suelo a través del análisis de las velocidades sísmicas y el periodo fundamental de vibración.
- Evaluar el Peligro Sísmico Probabilístico para el correcto cálculo de los máximos aceleraciones solicitadas para el análisis del suelo.

1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.

En los últimos 20 años, muchas investigaciones acerca de este tema han sido publicadas alrededor del mundo, con especial atención a las capitales y/o ciudades importantes de países ubicados en zonas altamente sísmicas, como por ejemplo Manizales en Colombia (Universidad de los Andes, 2002), Concepción en Chile (Montalva et al., 2012) y Quito en Ecuador (Aguilar et al., 2013). En dichos estudios, se ha utilizado diversos enfoques y técnicas de exploración y análisis, de tal manera de que el problema de amplificación sísmica ha sido abordado considerando las particularidades propias de cada caso.

Instituciones como el Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) y el Instituto Geofísico del Perú (IGP), realizan estudios de microzonificación sísmica y análisis de ondas sísmicas en el Perú. Producto de ello, se tienen diversas investigaciones Díaz (2010), Sifuentes (2012),

Cabrejos (2013), Herrera (2013), Pretell (2014), Soto (2016), Arredondo (2016), Ramos (2017) e IGP (2021).

1.5 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.

El análisis del mapa de microzonificación obtenido de manera multidisciplinaria, brindará mejores resultados para el desarrollo urbano del distrito mediante la adecuada delimitación de zonas con igual comportamiento dinámico, ocasionando la correcta implementación de políticas y planes de gestión de riesgo de desastres. Así se podrá, generar un mejor ordenamiento territorial, mediante la identificación de las zonas más vulnerables y de mayor probabilidad de daños.

1.6 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.

Capítulo I, posee la Introducción de la presente investigación que brinda nociones generales sobre el tema abordado como generalidades, problemática, antecedentes, formulación de la hipótesis, organización de la tesis y aspectos generales.

Capítulo II, contiene los Marcos Teóricos y Conceptual proporciona información para la comprensión y entendimiento de los temas desarrollados en la investigación.

Capítulo III, abarca la descripción de las Peligro Geológico y Caracterización Geotécnica presentes en la zona de estudio, se procesó y analizó los resultados de los ensayos recopilados, se identificó áreas en las que el suelo presento características semejantes, luego se definió el mapa de tipos de suelo del distrito con valores de capacidad portantes similares.

Capítulo IV, la Caracterización Dinámica emplea información recopilada y ejecutada, se generó perfiles sísmicos complementarios teniendo como resultado la delimitación de sectores con características mecánicas-dinámicas similares.

Capítulo V, la Evaluación de Peligro Sísmico Probabilístico proporciona los espectros de peligro uniforme de la zona estudiada y la desagregación sísmica identificada.

Capítulo VI, el Análisis de Amplificación Sísmica brinda los espectros de diseño, los cuales fueron comparados con los proporcionados por la Norma de Diseño

Sismorresistente. Finalmente se genera el mapa de Microzonificación Sísmica con la intervención de las disciplinas anteriormente mencionadas.

Se debe resaltar que los diversos ensayos realizados para la presente tesis conto con el apoyo del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID).

1.7 ASPECTOS GENERALES.

1.7.1 Ubicación

El área de estudio comprende el distrito de Comas. El distrito de Comas se ubica a una altitud que varía desde 150 a 811 m.s.n.m.; en la provincia de Lima, departamento de Lima. Su extensión queda definida, aproximadamente, por las siguientes coordenadas geográficas:

11° 53' 17.60" a 11° 58' 37.20" Latitud Sur

77° 04' 22.08" a 76° 59' 28.66" Longitud Oeste

La extensión del área de estudio es de aproximadamente 4872.00 Ha.

1.7.2 Población

La población del distrito de Comas estimada en el año 2020 es de 573,884 habitantes (INEI). El Distrito de Comas tiene una de las más altas tasas de crecimiento demográfico, que según el Instituto Nacional de Estadísticas e Informática INEI. Cabe destacar que el 57% de la población total de Distrito está concentrada básicamente en los pueblos jóvenes y asentamientos humanos (Municipalidad Distrital de Comas, 2017).

Se muestra la ubicación de la zona de estudio de acuerdo a la información brindada por la Municipalidad de Comas (2020). La distribución de uso de suelos del distrito de acuerdo al Instituto Metropolitano de Planificación y Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2016).

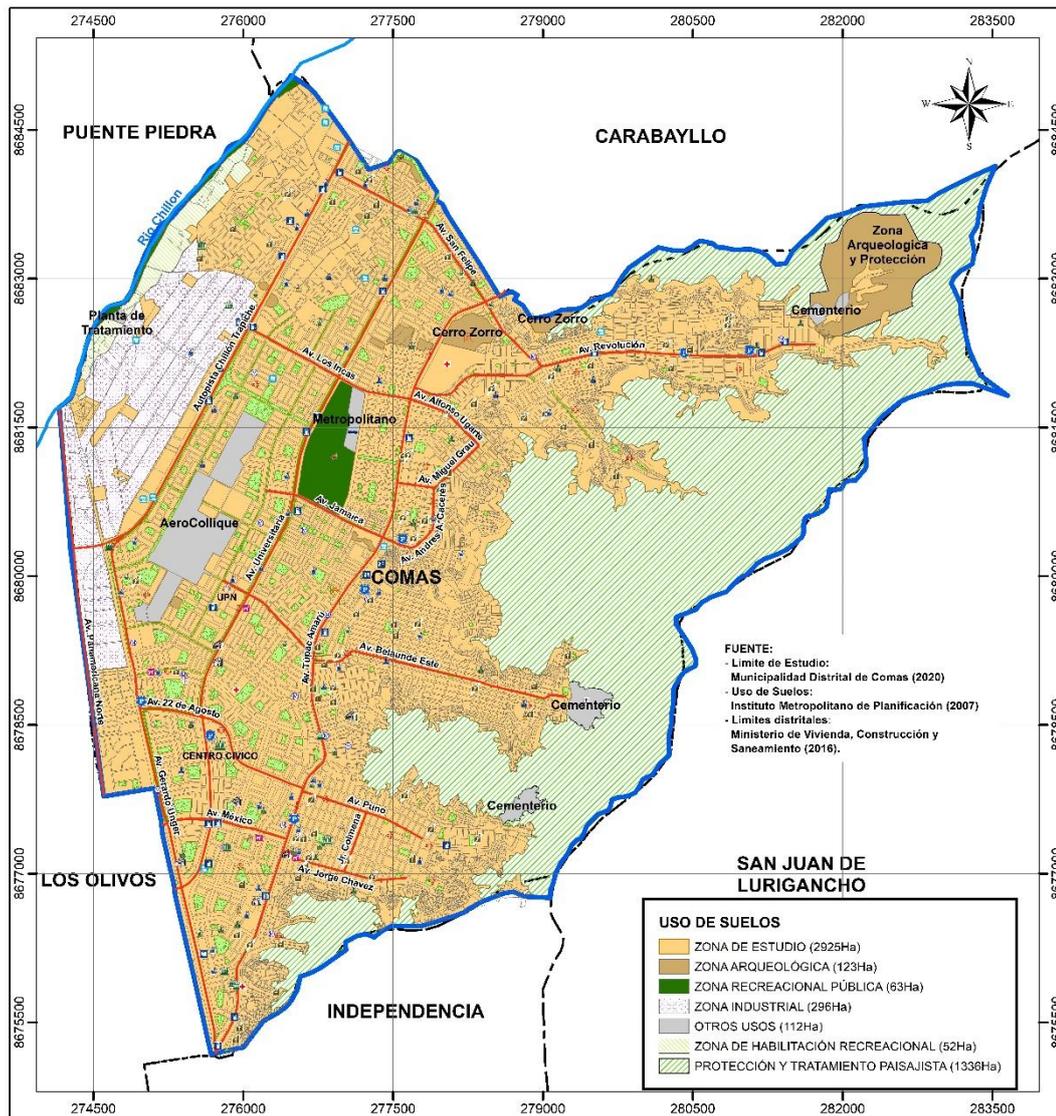


Figura N°1: Mapa de Ubicación del Distrito de Comas - Adaptación MDC, IMP y MVCS.

El 90% de los sismos registrados hasta la actualidad ocurrieron en los bordes de contacto de las placas. Los sismos se pueden agrupar de acuerdo a su profundidad en superficiales (<70km), intermedios (<300km) y profundos (>300km). Los sismos se producen tanto en áreas próximas a la línea de encuentro entre placas. El ángulo de buzamiento de la zona de subducción de la placa, varía a lo largo del litoral del Perú de la siguiente manera: norte (aprox. 10°) al sur (máximo 30°). Sismos históricos de magnitud considerable sucedieron en el Perú en los siguientes años: 1604, 1687, 1746 y 1868.

Con respecto al fenómeno de subducción, este genera la sumersión de la placa oceánica (material basáltico, más denso y pesado) bajo la continental (más liviana composición granítica y sedimentaria), produciendo una trinchera o fosa a lo largo de la costa. En la zona de contacto entre las placas se generan fuerzas de fricción, que aumentan la temperatura y presión en el material que está descendiendo, calentando y fundiendo parcialmente dicho material. Presenta mayor actividad sísmica, sismos de mayor magnitud con focos sísmicos variables, cuya área de ruptura sufre desplazamientos relativos mayores. La actividad presente en la zona de subducción dependerá del ángulo de buzamiento, por ejemplo, cuando el ángulo de buzamiento es mayor, los terremotos no alcanzan magnitudes tan notables (Sauter, 1989).

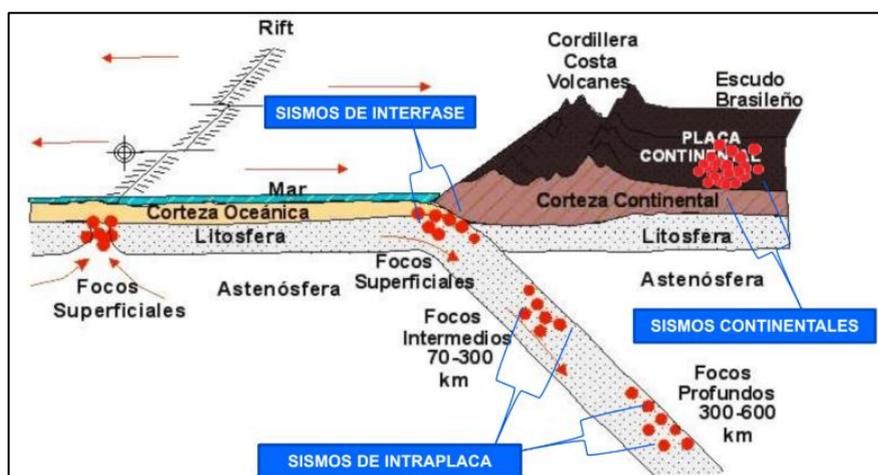


Figura N°3: Tipo de Sismos. Tomado de Aguilar Z. (2011)

Los patrones de recurrencia son importantes para predecir futuros sismos, en fallas activas, de este modo se tendrá conocimiento del riesgo sísmico y toma de decisiones en ingeniería. Si se tiene conocimiento de la longitud o área de ruptura se podrá estimar magnitudes. (Sauter, 1989).

La sismicidad es la distribución espacial y temporal de los sismos ocurridos en una zona junto con sus principales parámetros como de localización (coordenadas epicentrales, profundidades del hipocentro y tiempo origen) y tamaño (magnitud, intensidad y momento). El primero permite definir las zonas sismogénicas, el segundo permite evaluar la importancia de las fuentes. Para definir las fuentes sismológicas se necesita recopilar información sismología, geológica y geofísica. Se requerirá el desarrollo de relaciones de recurrencia que se basa en la distribución de magnitudes y número de eventos. Gutenberg y Richter propusieron una relación empírica entre magnitud y frecuencia, grafico lineal en escala semilogarítmico

$$\log N = a - bM \quad \text{Ecuación 1}$$

N : Numero de eventos de magnitud mayor que M por unidad de tiempo

a y b : Constantes sísmicas características de cada región

M : Magnitud expresada en escala de Richter

2.1.2 Ondas Sísmicas

Existen dos tipos de ondas de propagación denominadas ondas internas o de cuerpo y las ondas de superficie. Las ondas de cuerpo se dividen en ondas P (primarias, longitudinales o de comprensión) y las ondas S (secundarias, transversales o de cizalla). Las ondas superficiales se dividen en ondas L (Love) y ondas R (Rayleigh). Las ondas P pueden propagarse con mayor velocidad en medios sólidos (roca) y líquidos (magma interior de la tierra o agua), al entrar en contacto con la superficie se puede transmitir en forma de sonido, a diferencia de las ondas S que no se transmiten en medios líquidos. Cerca de la fuente las ondas P presentan mayores desplazamientos verticales, luego ya las ondas S generan desplazamientos horizontales. Las ondas S presentan mayor amplitud y contenido de energía, causando mayor daño a las edificaciones. Las ondas de cuerpo son más rápidas que las de superficie, siendo las ondas L más rápidas que las Rayleigh (Sauter, 1989).

Las ondas superficiales como Rayleigh y Love, experimentan el fenómeno de la dispersión, razón por la cual es importante diferenciar entre la velocidad de fase (máximos y mínimos) y de la velocidad de grupo (energía transportada en función de la frecuencia) (Herraíz, 1997).

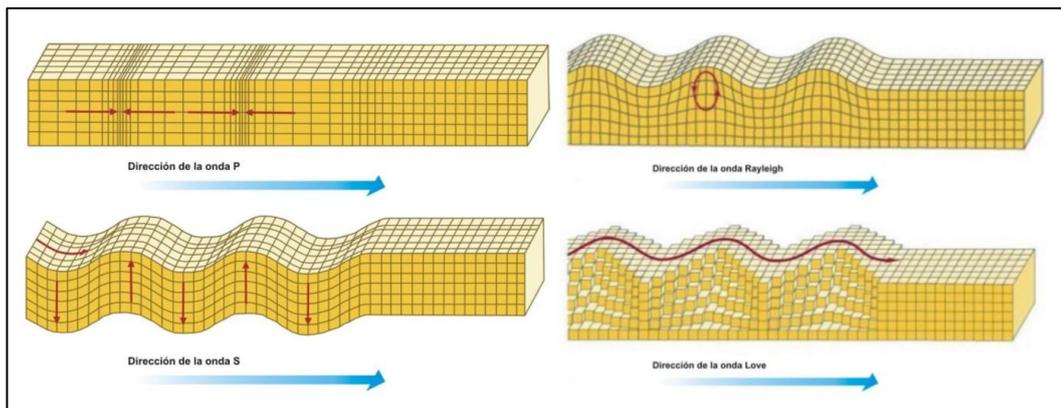


Figura N°4: Deformaciones producidas por las Ondas de Cuerpo y Superficiales. Tomado de Roncal (2017)

2.1.3 Parámetros de Localización y Tamaño

La sismicidad relativa de un país o una región se obtiene a través de la localización espacial de los focos sísmicos, graficando su distribución en una proyección horizontal. El principio de localización dependerá del tiempo necesario para que las ondas sísmicas lleguen de la fuente al punto de medición (acelerógrafo). Se necesita contar con tres estaciones para determinar la posición exacta del foco y su profundidad se establece a través de estaciones cercanas para obtener valores confiables.

En cuanto a la ocurrencia de los sismos, la secuencia más estudiada es la de sismos precursoros - evento principal - réplicas. La quietud sísmica es la disminución de la razón de la sismicidad en función del tiempo, ocasionando la tendencia de ocurrencia de grandes sismos en lugares específicos conocidos como brechas o lagunas sísmicas (Herraíz, 1997).

La medida más generaliza para el cálculo de intensidad registrada es a través de la aceleración máxima del terreno (PGA). Dentro de las escalas de intensidad más utilizada se tiene a la escala Mercalli Modificada (MM) va de grado I a grado XII, con sus respectivas descripciones. A través de las intensidades sentidas por los pobladores se logra generar mapas de isosistas.

Tabla N°1: Escala de Intensidad de Mercalli Modificada. Tomado de CENEPRED (2014)

GRADO	DESCRIPCIÓN
I	No sentido excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables.
II	Sentido solo por muy pocas personas en reposos, especialmente en pisos altos de edificaciones. Objetos suspendidos delicadamente pueden oscilar.
III	Sentido muy sensiblemente por las personas dentro de edificaciones, especialmente las ubicadas en los pisos superiores. Muchas personas no se dan cuenta que se trata de un sismo.

GRADO	DESCRIPCIÓN
	Automóviles parados pueden balancearse ligeramente. Vibraciones como las producidas por el paso de un cambio. Duración apreciable.
IV	Durante el día sentido en interiores por muchos, al aire libre por algunos. Por la noche algunas se despiertan. Platos, ventanas, puertas agitadas; las paredes crujen. Sensación como si un camión chocara contra el edificio. Automóviles parados se balancean apreciablemente.
V	Sentido por casi todos, muchos se despiertan. Algunos platos, ventanas y similares rotos; grietas en el revestimiento de algunos sitios. Objetos inestables volcados. Algunas veces se aprecia balanceo de los árboles, postes y otros objetos altos. Los péndulos de los relojes pueden pararse
VI	Sentido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. Algunos muebles pesados se mueven; algunos casos de caída de revestimientos y chimeneas dañadas. Daño leve.
VII	Todo el mundo corre al exterior. Daño significativo en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras corrientes bien construidas; considerable en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas; se rompen algunas chimeneas. Notado por personas que conducen automóviles.
VIII	Daño leve en estructuras diseñadas especialmente; considerables en edificios corrientes sólidos con colapso parcial; grande en estructuras de construcción pobre. Paredes separadas de la estructura. Caída de chimeneas, rimeros de fábricas, columnas, monumentos y paredes. Muebles pesados volcados. Eyección de arena y barro en pequeñas cantidades. Cambios en pozos de agua. Conductores en automóviles entorpecidos.
IX	Daño considerable en estructuras de diseño especial; estructuras con armaduras bien diseñadas pierden la verticalidad; grande en edificios sólidos con colapso parcial. Los edificios se desplazan de los cimientos. Grietas visibles en el suelo. Tuberías subterráneas rotas.
X	Algunos edificios bien construidos de madera destruidos; la mayoría de las obras de estructura de ladrillo, destruidas con los cimientos; suelo muy agrietado. Carriles torcidos. Corrimientos de tierra considerables en las orillas de los ríos y en laderas escarpadas. Movimientos de arena y barro. Agua salpicada y derramada sobre las orillas.
XI	Pocas o ninguna obra de albañilería queda en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el suelo. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio. La tierra se hunde y el suelo se desliza en terrenos blandos. Carriles muy retorcidos.
XII	Destrucción total. Se ven ondas sobre la superficie del suelo. Líneas de mira (visuales) y de nivel deformadas. Objetos lanzados al aire.

2.1.4 Transmisión de Ondas Sísmicas

Existen características que afectan la propagación de las ondas sísmicas, de las cuales se puede nombrar: condiciones geológicas del subsuelo, topografía del terreno, mecanismo del terremoto y su direccionalidad. La propagación de las ondas aumenta de pasar de un medio rígido a uno menos rígido, esto se debe a la velocidad de propagación de los medios. Estas condiciones del suelo afectan la amplitud de las ondas, cuando las ondas P y S alcanzan la superficie, gran parte de su energía es reflejada hacia el interior de la Tierra, haciendo que la superficie terrestre sea afectada por trenes de ondas que se mueven simultáneamente hacia arriba y hacia abajo. Además, se tiene el efecto de resonancia que afecta a las edificaciones cuyo periodo predominante se acerca al periodo predominante del suelo.

2.1.5 Aceleración: Parámetro de Diseño

En cuanto a la aceleración, es un parámetro muy empleado para cálculos sismorresistente, de igual manera para determinar intensidades. Este puede ser expresado en gals (cm/s^2) o en porcentaje de la gravedad. La velocidad y

desplazamiento pueden ser obtenidos por integración, a través de análisis se logrará describir el movimiento sísmico para estimar una respuesta de las edificaciones.

Las relaciones de atenuaciones propuestas son empíricas, utilizando la aceleración para describir la intensidad, en función de la magnitud, la distancia epicentral y la distancia focal. Existe una gran dispersión de los resultados observados y teóricos, debido a la calidad de los datos y las condiciones del terreno. Esta es una herramienta útil para calcular la intensidad probable en un determinado sitio a cierta distancia de la falla o fuente sísmica.

Luego de ocurrido un sismo, puede traer varias consecuencias al suelo de fundación tanto como a las estructuras existentes sobre él, tasa de pérdida humanas, generación de incendios, etc. Perú es un país con gran actividad sísmica, sismos de magnitud considerable afectaron significativamente a la población e infraestructura a lo largo de la historia.

Tabla N°2: Principales terremotos – Adaptación de Herraíz (1997) y Alva (2020).

Año	Localidad	Magnitud	Prof. Km	Número Muertos	Observaciones
1746	Lima	8.4	30	5000	Gran tsunami
1868	Chile y Perú	8.5	25	25000	Gran tsunami en Arica
1940	Lima	8.2	60	179	Punto de inflexión en la comprensión del riesgo sísmico en Lima y su vulnerabilidad estructural.
1946	Ancash	7.4	30	1400	Deslizamientos de tierra
1966	Lima	8.1	60	-	Uno de los primeros sismos registrados por la red de estaciones acelerográficas
1970	Chimbote	7.8	43	67000	Mayor catástrofe sísmica continente americano, gran avalancha de lodo
1974	Lima	7.6	13	78	Daños en Lima
1996	Ica	7.7	20	20	Leve tsunami
2001	Arequipa	8.2	30	102	Tsunami
2005	San Martín	7.5		10	164 heridos y 12600 damnificados
2007	Ica	8.0	40	600	Leve tsunami
2011	Pucallpa	7.0	145	3	70 heridos, presencia de deslizamientos y derrumbes.
2013	Arequipa	7.1	31	-	48 heridos, 1763 damnificados, presencia de deslizamiento lateral de suelos y derrumbes.
2018	Arequipa	7.1		2	103 heridos
2019	Alto Amazonas	7.5	141	8	11 heridos, 86 familias damnificadas y 74 familias afectadas.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 Evaluación de Peligro Sísmico

El peligro sismo o amenaza sísmica es la probabilidad de ocurrencia de un movimiento sísmico (sismicidad) de mayor o igual intensidad en un periodo de tiempo (exposición sísmica), esto es expresado en tasas de excedencia de valores de aceleración máxima en la zona de estudio en función de la información sismológica disponible (tectónica regional, geología local, condiciones locales de suelo y los parámetros de evaluación de eventos sísmicos recopilados). Existen dos metodologías para realizar la evaluación: el método determinístico (escenario particular) y probabilístico (conjunto de escenarios con diferentes ubicación y tiempo de ocurrencia) (Kramer, 1996).

La Tectónica Regional o Tectónica General de Placas nos brindaran una idea de las placas presentes en la zona de estudio, y que podrían afectarlas. La Geología Local considera la presencia de deformaciones por fallas locales, además incluye localización y cartografiado de fallas activas o recientemente activadas. Las fallas geológicas activas son la principal fuente de sismos superficiales. Los mapas de eventos sísmicos muestran la ubicación de sismos históricos, necesarios para obtener la zonificación sísmica (Herraíz, 1997).

Los métodos de evaluación consideran que los sismos son fenómenos estacionarios y que los sismos futuros presentaran las mismas características que los sismos del pasado. Dentro de las relaciones de frecuencia-magnitud para el cálculo de peligro se tiene de distribución truncada (Método Probabilístico) y de valores extremos (Método Determinístico); pero los valores extremos necesitan un catálogo sísmico con muestras de terremotos grandes, razón por la cual no se recomienda aplicar en esta investigación.

Método Probabilístico

Las metodologías desarrolladas para el cálculo de peligro sísmico probabilístico fueron desenvueltas por Esteva (1968), Cornell (1968) y Cornell y Vanmarcke (1969); su validez dependerá de la cantidad y calidad de datos empleado. Con ayuda de las leyes de atenuación, la sismicidad calculada se referenciará a la zona de estudio y la peligrosidad final se calculará con la suma de influencia de las fuentes (IGP, 2014).

El modelo de Poisson propone que los eventos sísmicos son independientes espacialmente y temporalmente, además la probabilidad que ocurran dos eventos sísmicos en el mismo lugar y tiempo tiende a cero. La primera suposición implica que entre eventos sísmicos no se ven afectados por la ocurrencia u no ocurrencia de otro evento en otro sitio. La segunda suposición indica que los eventos sísmicos no tienen memoria y la tercera, que en un intervalo de tiempo no puede ocurrir más de un evento sísmico (Sauter, 1989).

$$P_n(t) = \frac{e^{-kt} (kt)^n}{n!} \quad \text{Ecuación 2}$$

$P_n(t)$: Probabilidad de ocurrencia de n eventos en un intervalo de tiempo t .

n y k : Número de eventos y frecuencia media de ocurrencia por unidad de tiempo.

Para obtener la probabilidad de ocurrencia de un evento en un tiempo t :

$$P [\text{al menos un evento en tiempo } t] = 1 - e^{-kt} \quad \text{Ecuación 3}$$

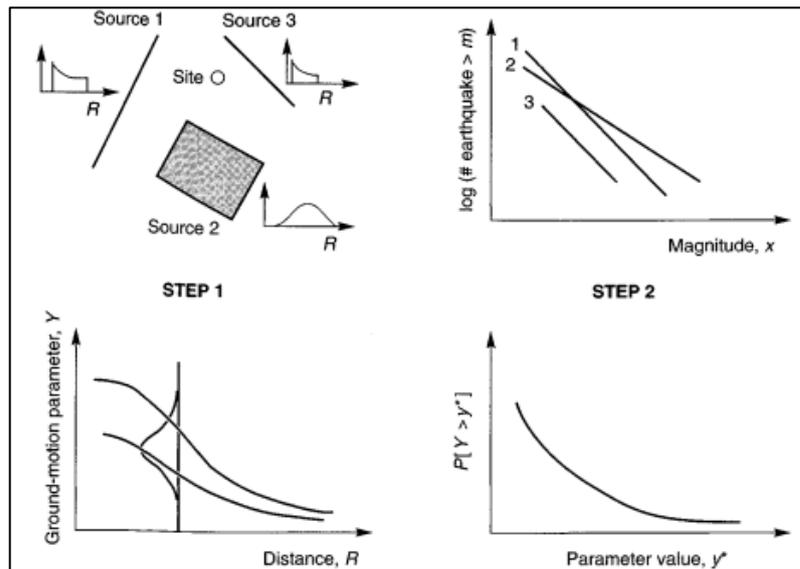


Figura N°5: Esquema de peligro sísmico probabilístico. Tomado de Kramer (1996)

2.2.2 Caracterización Geológica

La caracterización geológica de la zona de estudio es fundamental para la realización de cualquier estudio posterior, se basa en diversos estudios (geología, modelo estratigráfico, etc.) para su formulación. Representa las propiedades geomorfológicas y litoestratigráficas, que permitirá identificar zonas vulnerables a

desastres naturales (caída de materiales, deslizamientos, huaycos, inundaciones, etc.) y donde se podrían plantear estudios complementarios.

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) es la institución de generación de información de marco geológico en Perú, pero, además, se cuenta con estudios complementarios como los que son elaborados en investigaciones geocientíficas o informes de otras instituciones. Una vez que se posee toda la información disponible, se procede a hacer el análisis general de la zona de interés. De esta manera, se obtiene los criterios necesarios para el mapa de peligros geológicos.

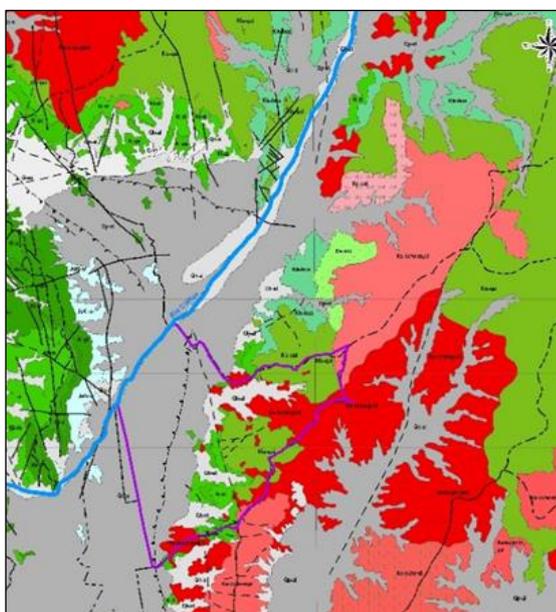


Figura N°6: Mapa de Geología Regional del distrito de Comas. Tomado de INGEMMET (2017)

Peligro Geológico

El riesgo originado por fenómenos naturales también depende de la exposición de centros urbanos, debido a su ubicación en zonas vulnerables como riberas de ríos, quebradas, rellenos sanitarios, fallas geológicas, etc.; adicionando las precarias edificaciones impactadas, será más difícil afrontar la problemática.

Los riesgos originados por fenómenos naturales se clasifican en función de su recurrencia y variabilidad espacial del fenómeno, la generación de informes o estudios son elaborados sustentándose en estudios o ensayos como de suelos, geológicos, geotécnicos, microtremores, hidrológicos e hidrometeorológicos que influyen en el ámbito geográfico.

Tabla N°3: Tipos de Análisis Cuantitativos de Peligros. Tomado de CENEPRED (2014)

RECURRENCIA Y VARIABILIDAD ESPACIAL DEL FENÓMENO	TIPO DE ANÁLISIS	FENÓMENO
Impactan siempre en la misma área	Análisis de frecuencia en función o no de la magnitud. Simulaciones a través de métodos probabilísticos o determinísticos.	Inundaciones Deslizamientos Tsunamis
Impactan en áreas diferentes	Espacial en función o no de la magnitud. Espacial y frecuencia en función o no de la magnitud. Simulación/modelización con métodos determinísticos y/o probabilísticos.	Lahares Terremotos Flujos de lava
Impactan una vez solamente	Simulación/modelización con métodos determinísticos y/o probabilísticos.	Desastres

La clasificación de peligros generados por fenómenos de origen natural se agrupa en: Geodinámicas Interna, Externa e hidrometeorológicos y oceanográficos. Para la identificación y caracterización de estos fenómenos, es necesario identificar los parámetros de evaluación.

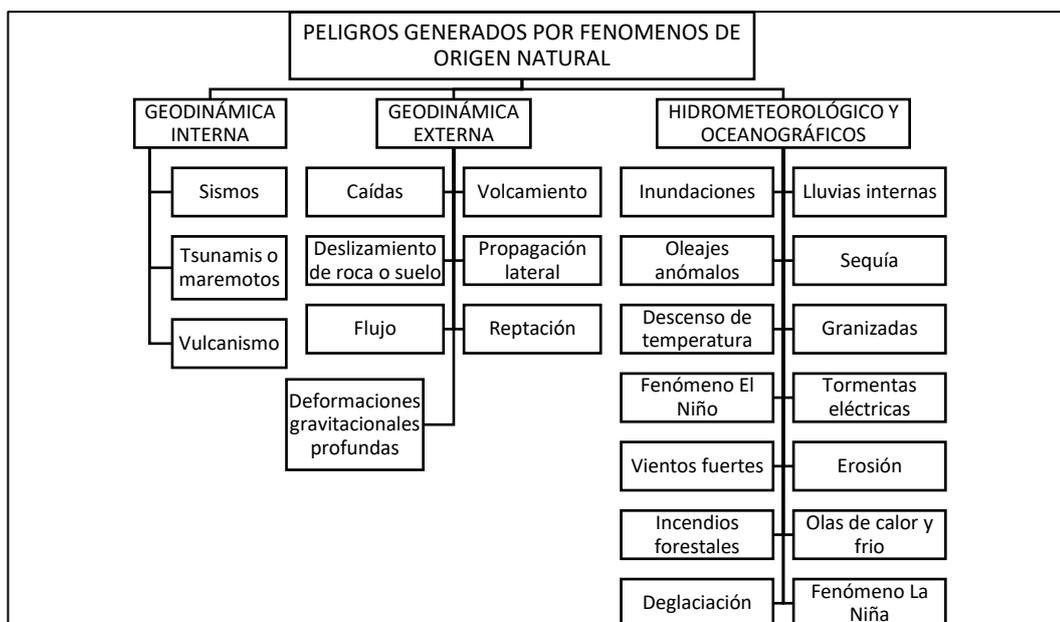


Figura N°7: Clasificación de Peligros originados por fenómenos naturales. Tomado de CENEPRED (2014)

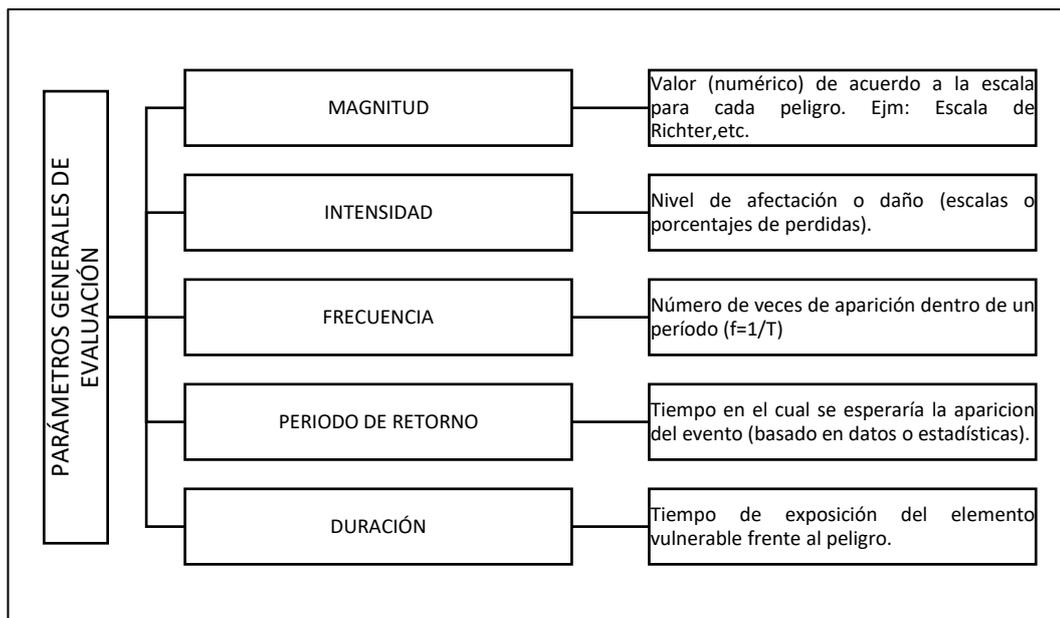


Figura N°8: Parámetros generales de evaluación para la identificación y caracterización de Peligros Generados por Fenómenos Naturales. Tomado de CENEPRED (2014)

2.2.3 Caracterización Geotécnica

La determinación de las características geotécnicas se realiza tomando como referencia los estudios de mecánica de suelos recopilados (SEDAPAL, municipalidades, empresas del sector privado y público), se cuenta con un gran número de estudios de mecánica de suelos de proyectos de ingeniería y registros de pozos de agua.

Con la información obtenida se procede a encontrar los perfiles de suelos para luego definir zonas con características geotécnicas similares. Los perfiles estratigráficos de cada uno de estos puntos fueron integrados a un sistema de información geográfica (SIG), para visualizar con mayor claridad la variabilidad espacial de los diferentes tipos de suelos y correlacionar con la información geofísica disponible. Finalmente, se elaboran mapas de suelos de importancia para la cimentación de viviendas comunes, útil para los proyectistas y constructores para tener una idea previa del tipo de suelo que se encuentra bajo el área a construir, para realizar un apropiado diseño de cimentaciones, y plan constructivo que más se adecúe al tipo de suelo.

Ensayos de Campo

La excavación de calicatas es una técnica de prospección geotécnica que nos permite obtener información a través de una excavación superficial a profunda. La profundidad de excavación dependerá de la demanda del proyecto y de las propiedades geotécnicas del suelo de inspección. La inspección realizada se ejecutará de forma directa por lo que generará información confiable y completa. Con las muestras extraídas se puede realizar el contenido de humedad (ASTM, 2017), análisis físicos y químicos. Todas las calicatas deberán ser correctamente georreferenciadas para una correcta interpretación de los mapas productos de geotécnica (ASTM, 2018).

El Ensayo de Penetración Estándar (SPT) es un ensayo de campo, cuyo objetivo es medir la resistencia y compacidad del suelo a través del hinchamiento dinámico. Se podrá obtener muestra del tubo partido que posteriormente se podrá enviar al laboratorio para ensayos pertinentes (contenido de humedad, granulometría, límites de consistencia o peso específico). Este ensayo realiza en suelos arenosos y arcillosos, debido a que la presencia de gravas no será posible continuar con el hinchamiento de la cuchara partida (ASTM, 2018).

La auscultación dinámica con el Cono Peck (CP) solo es utilizada en el Perú, es empleado la misma maquinaria del ensayo SPT, pero haciendo un cambio de cuchara, de caña partida a punta cónica (60°), logrando un hinchamiento continuo y más rápido.

Capacidad de Carga del Suelo

Terzaghi (1943) propuso una formulación para determinar la última capacidad de carga, el cual ocurre para una falla general en un cimiento corrido rugoso.

$$q_u = c' \lambda_{cs} \lambda_{cd} \lambda_{ci} N_c + q \lambda_{qs} \lambda_{qd} \lambda_{qi} N_q + \frac{1}{2} \lambda_{\gamma s} \lambda_{\gamma d} \lambda_{\gamma i} \gamma B N_\gamma \quad \text{Ecuación 4}$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan(45 + \frac{\phi'}{2})^2 \quad N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \quad N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi')$$

N_c , N_q y N_γ : Factores de capacidad de carga de acuerdo a sus contribuciones de cohesión, sobrecarga y peso específico.

La última formulación Terzaghi (1967) para la capacidad de carga de suelo para cimentaciones superficiales, fue una propuesta generada a partir que varios

investigadores partiendo de la primera formulación Se comparó las ecuaciones, los valores N_c y N_q no se veían afectados, a diferencia del N_γ que variaba ampliamente. Para el análisis de la carga, Terzaghi (1943) considero la sección el fragmento I (cuña debajo de la zapata) zona activa de Rankine, a diferencia Terzaghi (1967) lo considera zona elástica. Para efectos prácticos, ambas propuestas presentan resultados aceptables. La propuesta a aplicar en la presente investigación será las dos propuestas de Terzaghi (1943 y 1967) para comparar los resultados, cabe mencionar que la norma E.050 Suelos y Cimentaciones utiliza la formulación propuesta de 1943 (Das, 2006).

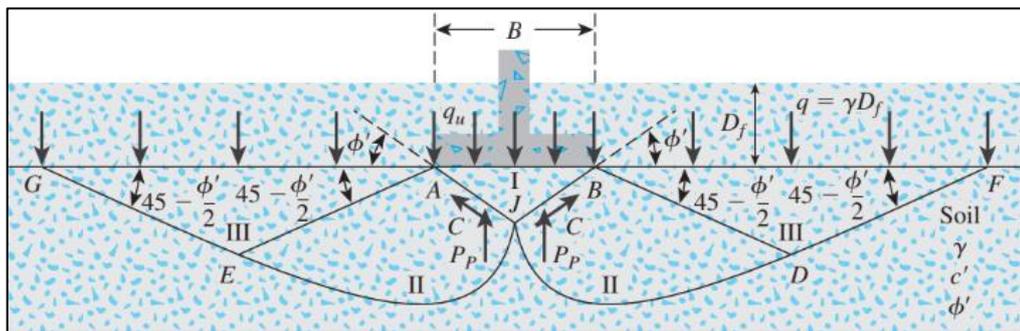


Figura N°9: Análisis de la Capacidad de Carga de Terzaghi. Tomado de Das (2006)

$$q_u = c'N_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad \text{Ecuación 5}$$

$$N_c = \tan \phi' (K_c + 1) \quad N_q = K_q \tan \phi' \quad N_\gamma = \frac{1}{2} \tan \phi' (K_\gamma \tan \phi' - 1)$$

K_c, K_q y K_γ : Coeficientes de presión de tierra en función del ángulo de fricción ϕ'

Para el caso de falla local se puede considerar las siguientes formulaciones:

$$\bar{c}' = \frac{2}{3}c' \quad \tan \bar{\phi}' = \frac{2}{3}\tan \phi'$$

$$q'_u = \bar{c}'N'_c + qN'_q + \frac{1}{2}\gamma BN'_\gamma \quad \text{Ecuación 6}$$

N'_c, N'_q y N'_γ : Factores modificados de capacidad de carga usando las mismas formulaciones anteriores de N_c, N_q y N_γ pero sustituyendo $\bar{\phi}' = \tan^{-1}(\frac{2}{3}\tan \phi')$

El factor de seguridad F_s es comúnmente considerado 3 para la capacidad del suelo, este es un valor conservador debido a las características naturales de un suelo que no son homogéneos ni isotrópicos y por la incertidumbre en la evaluación del parámetro de esfuerzo de corte del suelo. La capacidad de carga

bruta es definida con la siguiente expresión, de esta manera se evita la probabilidad de fallas:

$$q_{all} = \frac{q_u}{F_s} \quad \text{Ecuación 7}$$

La capacidad de carga neta permitida es el resultado de ultima capacidad de carga menos el esfuerzo vertical efectivo.

$$q_{u(net)} = q_u - q \quad \text{Ecuación 8}$$

Para la estimación de asentamientos, se utilizan aplicaciones empíricas modificadas en función de la teoría de elasticidad (propiedades del material). Las deformaciones serán basadas en constantes elásticas, que pueden obtenerse de ensayos de laboratorio. Las deformaciones pequeñas son independientes del tiempo, pero en función de cargas aplicadas. El asentamiento total para arenas, gravas, arcillas duras y suelos no saturados, es igual al asentamiento inmediato cuya formulación es la siguiente (Alva, 2011):

$$S_i = \frac{q_{adm} B (1 - \mu^2) I_f}{E_s} \quad \text{Ecuación 9}$$

I_f : Relación de Poisson

E_s : Módulo de Elasticidad (ton/m²)

μ : Factor de Forma (cm/m)

Tabla N°4: Valores de la relación de Poisson con respecto al tipo de suelo. Tomado de Alva (2011)

TIPO DE SUELO	μ
ARCILLA SATURADA	0.4 – 0.5
NO SATURADA	0.1 – 0.3
ARENOSA	0.2 – 0.3
LIMO	0.3 – 0.35
ARENA DENSA	0.2 – 0.4
DE GRANO GRUESO	0.15
DE GRANO FINO	0.25
ROCA	0.1 – 0.4
LOESS	0.1 – 0.3
HIELO	0.36
CONCRETO	0.15

Tabla N°5: Valores de Modulo de Elasticidad con respecto al tipo de suelo. Tomado de Alva (2011)

TIPO DE SUELO	E_s (ton/m ²)
ARCILLA MUY BLANDA	30 – 300
BLANDA	200 – 400
MEDIA	450 – 900
DURA	700 – 2000
ARCILLA ARENOSA	3000 – 4250

TIPO DE SUELO	E_s (ton/m ²)
SUELOS GLACIARES	1000 – 16000
LOESS	1500 – 6000
ARENA LIMOSA	500 – 2000
ARENA SUELTA	1000 – 2500
DENSA	5000 – 10000
GRAVA ARENOSA DENSA	8000 – 20000
SUELTA	5000 – 14000
ARCILLA ESQUISTOSA	14000 – 140000
LIMOS	200 – 2000

Tabla N°6: Valores de Factor de Forma en función de la Zapata. Tomado de Alva (2011)

FORMA DE LA ZAPATA	VALORES DE I_f (cm/m)			CIMENTACIÓN RÍGIDA
	CIMENTACIÓN FLEXIBLE			
UBICACIÓN	CENTRO	ESQUINA	MEDIO	
RECTANGULAR				
L/B=2	153	77	130	120
L/B=5	210	105	183	170
L/B=10	254	254	225	210
CUADRADA	112	56	95	82
CIRCULAR	100	64	85	88

2.2.4 Caracterización Dinámica

La caracterización dinámica del suelo permite determinar el comportamiento del suelo frente a movimientos vibratorios y se basa en el análisis de las velocidades sísmicas, los periodos predominantes de vibración natural hallados mediante la medición de Puntual de Microtremores. Se dividieron los ensayos en función al tipo de fuente que emplea para la generación de ondas, los ensayos MASW y Refracción Sísmica utilizan fuente activa (generación humana); a diferencia de los ensayos de medición puntual de microtremores y los arreglo de microtremores que usan una fuente pasiva (fuente natural).

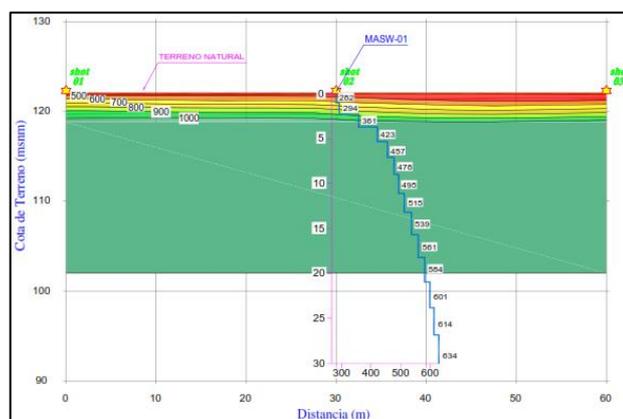


Figura N°10: Caracterización Dinámica – Correlación entre MASW y Refracción Sísmica. Tomado de ZER (2018)

El Mapa Isoperiodos se realiza con la información geofísica disponible, mediante procesos de interpolación y extrapolación en SIG. Este mapa estima las características de vibración del terreno durante un sismo, así como para conocer la estructura del subsuelo indicando las áreas donde se percibirían mayor intensidad de los sismos.

Ensayo MASW

Ensayo de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (siglas en inglés MASW) es un método geofísico con fuente activa que permite realizar la caracterización dinámica de suelos. El método multicanal registra de manera longitudinal la llegada de las ondas, esto permite un estudio único de un amplio rango de profundidad y altos niveles de redundancia con una sola configuración de campo (Park et al., 1999). Posee muchas ventajas como, por ejemplo: aplicado en áreas urbanas, muy útil para la auscultación en terrenos con diferentes espesores de suelos a través del análisis de las velocidades de onda Rayleigh que son registrados por los geófonos.

El procesamiento de la información obtenida en campo se basa en la selección de la curva de dispersión experimental, el análisis de la curva de dispersión se basa en la relación entre los ángulos de fase y el desplazamiento fuente-receptor (Lin et al., 2017). Luego se realiza la inversión para obtener las velocidades de onda de corte como una función de profundidad. La unión de dichas ondas generara la velocidad de ondas de fase que varía entre 90 y 95 % de las correspondientes a las ondas de corte, obteniendo así el perfil de velocidades de ondas de corte (V_s) (Wathelet et al., 2005).

La normativa peruana proporciona rangos de velocidad de onda de corte para las clasificaciones de sitio. Este ensayo indirecto necesita ser verificado por ensayos in situ, para tener la seguridad de la correcta interpretación de los datos obtenidos para finalmente obtener la correlación de parámetros dinámicos representativos.

Tabla N°7: Clasificación de los Perfiles de Suelo. Tomado de RNE (2019)

	PERFIL	\bar{V}_s (m/s)	\bar{N}_{60}	\bar{S}_u (KPa)
S_0	Roca Dura	>1500	-	-
S_1	Roca o Suelos Muy Regidos	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		

Ensayo de Refracción Sísmica

El Ensayo de Refracción Sísmica es un método geofísico del tipo activo, el cual se basa en la propagación de ondas sísmicas elásticas. El ensayo registra las vibraciones del terreno y determina la velocidad de propagación de las ondas en cada uno de los estratos del suelo, en función del tiempo de llegada de las ondas a los geófonos. Los datos de tiempo y distancia obtenidos para diferentes ubicaciones del punto de aplicación de la energía, nos permite determinar las velocidades de propagación de ondas longitudinales a través de los diferentes estratos de suelos y rocas cuya estructura, geometría y continuidad son investigadas. Generando así los perfiles de velocidad de ondas longitudinales a lo largo de la línea del ensayo de refracción y la determinación de módulos geotécnicos que permiten caracterizar y clasificar los suelos (Anomohanran, 2013). Formulaciones de módulo de Corte, coeficiente de Poisson y módulo de Young, respectivamente.

$$G = \rho V_s^2 ; \rho = 0.2 V_p^{0.25} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\mu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$E = 2(1 + \mu)G \quad \text{Ecuación 12}$$

El método se ejecuta en base a lo que determina la normativa internacional ASTM D5777 (ASTM, 2018). La longitud de la línea se encuentra relacionada en una proporción de 3 a 4 veces con la profundidad de investigación. A medida que la línea de refracción es más larga, la energía necesaria para es mayor, necesitándose en algunos casos explosivos.

El resultado del ensayo de Refracción Sísmica es un perfil sísmico bidimensional de velocidades de ondas longitudinales del suelo. Analizaremos los resultados obtenidos con el ensayo MASW, teniendo en cuenta el tipo de material inspeccionado con ensayos geotécnicos directos. Existen muchas correlaciones de rangos de valores de velocidades de ondas de corte en función del material, a continuación, presentaremos los más importantes:

Tabla N°8: Correlación de Velocidad de onda P en diferentes tipos de suelo y roca. Tomado de ASTM (2018)

DESCRIPCIÓN	$V_p \left(\frac{m}{s} \right)$
Suelo intemperizado	204 – 610
Grava o arena seca	460 – 915
Arena saturada	1220 – 1830
Arcilla saturada	915 – 2750
Agua ^a	1430 – 1665
Agua del mar ^a	1460 - 1525
Arenisca	1830 – 3960
Roca sedimentaria suave	2750 – 4270
Piedra caliza suave	1830 - 3960
Roca sedimentaria dura	2134 - 6100
Roca ígnea muy dura	4575 - 5800
Roca metamórfica	3050 - 7000

^a Depende de la temperatura y contenido de sales

Tabla N°9: Correlación de Velocidad de onda S y tipo de suelo (saturado), según CISMID.

DESCRIPCIÓN	$V_s \left(\frac{m}{s} \right)$
Limo	210
Arcilla	350
Arena	450
Arena Fina	460
Arena Media	600
Arena Gruesa	300
Arena Marina	360
Grava	510
Grava Gruesa	650

Medición Puntual de Microtremores

El objetivo de realizar el ensayo puntual de microtremores puntuales es obtener la estimación de respuesta de sitio de la zona de estudio utilizando una fuente pasiva (fuente natural de generación de ondas). Los microtremores son definidos como ruido ambiental o vibración, que están conformadas por ondas de cuerpo (Rayleigh y Love) de acuerdo a la estructura geológica del sitio. La medida de microtremores es uno de las metodologías más usadas para la caracterización dinámica de la zona de estudio. Este ensayo es rápido, bajo costo comparado con otros estudios geofísicos y de fácil aplicación en cualquier área. La data que se obtiene a partir de este ensayo se procesa con el método de Nakamura (H/V), es uno de los más eficientes y confiables métodos (Rezaei & Choobbasti, 2017).

Arai y Tokimatsu realizaron investigaciones los años 2000 y 2004, concluyendo que el periodo fundamental es el modo de vibración que tendrá mayor potencial de amplificación. El espectro H/V exhibe picos vinculados a las frecuencias de

resonancia del suelo debajo del sitio medido, genera curvas experimentales que representa las amplitudes espectrales promedio.

$$\frac{H}{V} = \frac{H_{Rayleigh} + H_{Love} + H_{Cuerpo}}{V_{Rayleigh} + V_{Cuerpo}} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z} \quad \text{Ecuación 13}$$

F_x , F_y y F_z : Espectros de amplitudes de Fourier del registro de onda en las direcciones horizontales (x e y) y vertical (z).

La relación espectral horizontal a vertical (HVSr) se usa comúnmente no solo en estudios de microzonificación sísmica (periodo fundamental), si no es posible inferir la profundidad del lecho de roca conociendo la velocidad de onda de corte promedio de cubierta sedimentaria subyacente, o viceversa. La técnica de Nakamura proporciona una estimación de límite inferior para la amplificación real (Mantovani et al., 2018).

$$T_o = \frac{4h}{V_s} \quad \text{Ecuación 14}$$

Una vez conocido el periodo fundamental, se logrará tener información de la estratigrafía como profundidad de la zona evaluada conociendo la velocidad de onda de corte promedio. Esto llevó en los últimos años a la implementación de diferentes métodos de computación en software dedicado para la elaboración y/o inversión de las curvas H/V. (Mantovani et al., 2018).

La formulación empírica propuesta por Ibs-von Seht y Wohlenberg en 1999, en la actualidad ha sido empleada por distintos investigadores para depósitos sedimentarios cuaternarios.

$$h = a\left(\frac{1}{T_o}\right)^b \quad \text{Ecuación 15}$$

a y b : Coeficientes empíricos correlacionados con las propiedades geotécnicas de sitio, obtenidos de resultados de perfiles de velocidades de ondas de corte.

Tabla N°10: Formulación para el cálculo de espesores de depósitos sedimentarios – Adaptado de diversos investigadores.

Investigadores	Año	Formulación	Descripción
Khalili M. Mirzakerdeh A.	2019	$104.94\left(\frac{1}{T_o}\right)^{-1.473}$	-
Gosar Lenart	2010	$105.5\left(\frac{1}{T_o}\right)^{-1.250}$	-

Investigadores	Año	Formulación	Descripción
Motamed	2007	$135.2\left(\frac{1}{T_0}\right)^{-1.979}$	-
Hinzen	2004	$137\left(\frac{1}{T_0}\right)^{-1.190}$	-
Paralai	2002	$108\left(\frac{1}{T_0}\right)^{-1.551}$	-
Karabulut Ozel	2018	$121.7\left(\frac{1}{T_0}\right)^{-0.55}$	Base rocosa ingenieril $760 < V_s \leq 1500 \text{ m/s}$
		$280.2\left(\frac{1}{T_0}\right)^{-0.39}$	Base rocosa sismológica $V_s > 1500 \text{ m/s}$
Chiew Cheah	2017	$121.16\left(\frac{1}{T_0}\right)^{-1.538}$	-

Lugares que poseen periodo predominante mayor a un segundo, indicaría depósitos profundos en el cual se recomendaría la combinación de métodos tomográficos sísmicos y eléctricos para llegar hasta el basamento rocoso u ensayos de gran profundidad de exploración como el arreglo de microtemores. La variación de las curvas H/V nos permite identificar cambios geológicos significativos dentro del área de estudio.

El SESAME es la institución que da recomendaciones para registros y caracterización de periodos fundamentales en la medición de microtemores. La guía del SESAME indica que si se posee diferentes resultados de los espectros H/V se debe a las siguientes razones:

- Pico H/V claro, posee un gran contraste de impedancia que indica el cambio brusco de rigideces.
- Múltiples picos H/V, indica variación lateral subterránea (presencia de pendientes entre materiales blandos y rígidos).
- Picos agudos H/V son picos amplios y suaves, típicos bordes de valle, característico de suelos heterogéneos que poseen diferentes contrastes de impedancia.
- Picos planos H/V, indica que no existe ningún contraste de impedancia a ninguna profundidad. No se confirma en el sitio la presencia de roca, o si superficialmente es sedimento que no ocurra ninguna amplificación. Se debe realizar otras técnicas geofísicas para confirmar la caracterización de sitio, excluyendo la medición puntual de microtemores.

Es importante mencionar, un pico adicional en el registro en el rango de alta frecuencia, esto se debe a perturbaciones generadas por maquinarias u otra fuente de ruido, razón por la cual no se debe tener en consideración dentro del análisis de los resultados.

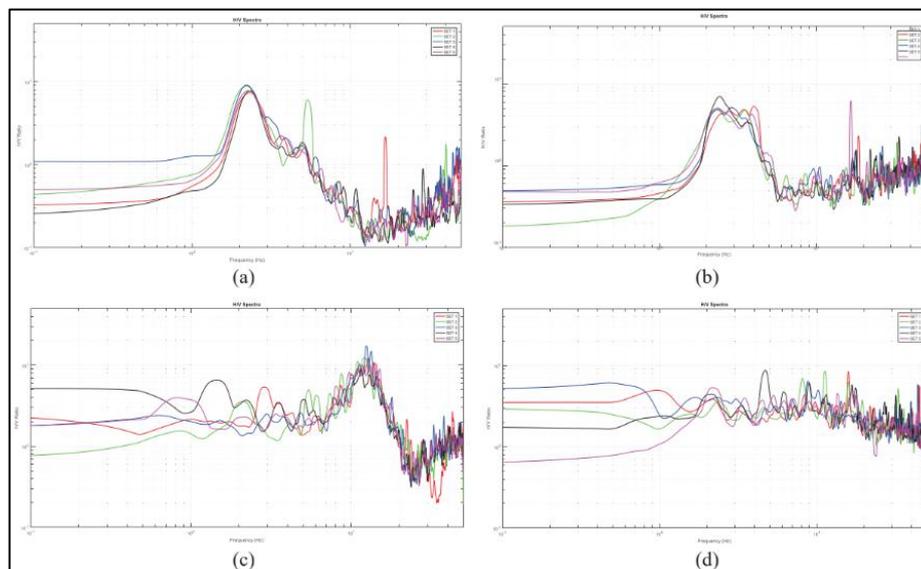


Figura N° 11: Patrones de espectro H/V (a) pico claro, (b) múltiples picos o ancho (c) picos agudos y (d) picos planos Tomado de Chiew, Cheah, Tan, y Lau (2017)

No se recomienda el uso de factores de amplificación ni de funciones de transferencia de la respuesta del suelo de los microtremores, debido que a que analiza una respuesta lineal para bajas amplitudes y bajas deformaciones de los suelos, a diferencia del caso de los sismos que ocurre una respuesta no-lineal por las grandes deformaciones que ocurren. Los microtremores permitirán determinar el periodo de vibración fundamental del suelo (Bermudez, 2002).

Medición de Arreglos de Microtremores

El ensayo de Arreglo de Microtremores es un método de exploración de fuente pasiva, beneficioso para la determinación de perfiles de velocidad de onda de corte con menos restricciones que otros métodos geofísicos y geotécnicos en áreas urbanas donde es importante conocer las vibraciones del medio. El arreglo de microtremores es más rápido, económico y posee mayor profundidad de exploración. (Mert, 2005). Para la determinación de la curva de dispersión experimental, es necesario aplicar el análisis de correlación de señales. La curva

de dispersión final es la combinación de las curvas de dispersión para diferentes rangos de frecuencia relacionados con diferentes intervalos de distancia.

Método de Alta Resolución Frecuencia – Número de Ondas (F-k)

El método F-k permite obtener las velocidades de fase del modo fundamental, pero la confiabilidad de los resultados depende de la geometría de la matriz, el tamaño de la matriz (número de sensores utilizados), las propiedades del campo de ondas de microtremores y la calidad de los datos registrados. El método F-k puede separar las ondas superficiales multimodales y las ondas de cuerpo, pero requiere una distribución uniformemente en acimut, con una variedad de distancias entre estaciones para garantizar estimaciones de alta resolución para el espectro de potencia F-k (Kudo et al., 2002).

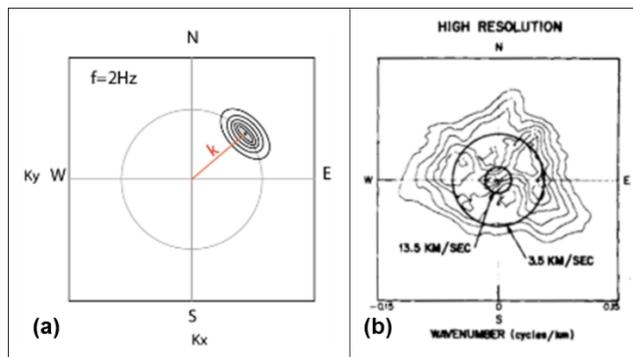


Figura N° 12: a) Espectros de número de onda de frecuencia (ciclos/m) de alta resolución frecuencia de 2Hz b) Aplicación. Tomado de Capon (1969).

Métodos Autocorrelación Espacial (SPAC)

El método *Spatial Autocorrelation* (SPAC) usa movimientos verticales registrados para generar una estimación de velocidad de fase única, que incluye los efectos de todos los modos, en cualquier frecuencia dada. Luego se demostró que podría utilizarse una disposición diferente de sensores para la matriz circular propuesta por Aki, lo que facilitó la observación de microtremores. Para calcular la velocidad de fase efectiva es necesario aplicar el método de Tokimatsu (2005) el cual considera las relaciones de excitación de diferentes modos de onda de Rayleigh.

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{0.90 \text{ a } 0.95 V_s}{f} \tag{Ecuación 16}$$

λ , f y C : Longitud de onda, frecuencia y velocidad de fase, respectivamente. Con profundidad de exploración $\frac{\lambda}{3}$.

Miyakoshi (1996) concluyo que la longitud de onda máxima observable es aproximadamente cinco veces o menos del radio de la matriz con el método F-k a diferencia del método SPAC que es de diez veces, razón por la cual ha sido empleado más popularmente la última metodología.

A comparación del método F-k, el método SPAC no puede separar modos de las ondas, pero requiere menos estaciones (mínimo tres o cuatro).

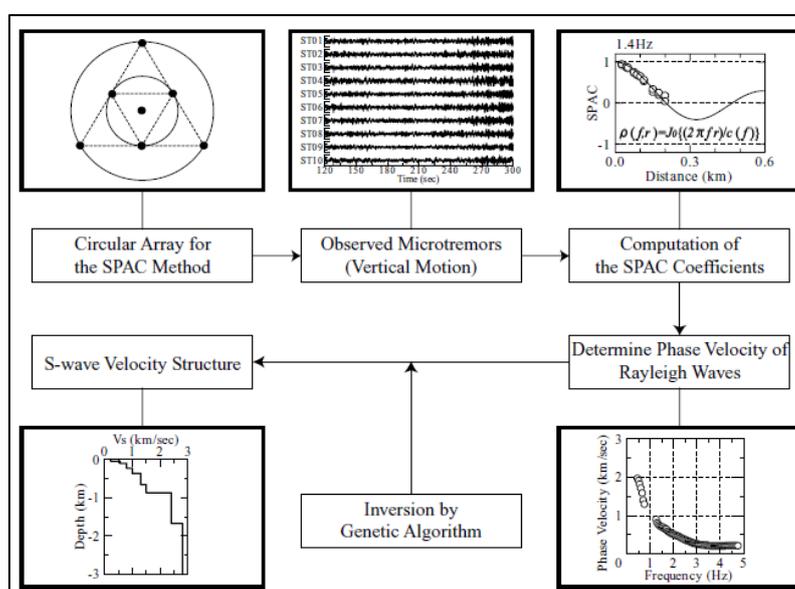


Figura N° 13: Flujo de observación y análisis en el método SPAC para estimar perfil de velocidad de onda S. Tomado de Kudo (2002).

Métodos Arreglo Circular Sin Centro (CCA)

Cho (2004) propuso el método de *Centreless Circular Array (CCA)* es un derivado del método SPAC. Puede utilizar un mínimo número de sensores proporcionando estimaciones precisas y estables de la velocidad de fase, analizo los resultados obtenidos empleando cinco y tres sensores, donde concluyo que es suficiente con usar tres sensores para tener resultados reales con un mayor rango de longitud de ondas, si la relación Ruido-Señal (NS) es bajo es posible tener estimaciones de las ondas Rayleigh de longitudes de ondas de hasta diez veces el radio del arreglo. Esta metodología puede omitir para el análisis el registro del sensor central,

además que la metodología CCA puede analizar longitudes de ondas más largas (resolución superior) que el método F-k y SPAC (Cho et al., 2006).

Métodos Ruido Compensado CCA (nc-CCA)

El método *noise-compensated* CCA (nc-CCA) utiliza una técnica de compensación de ruido para permitir que las velocidades de fase de onda de Rayleigh se identifiquen más allá del límite. Para el rango de bajas frecuencias (<2.5Hz) presenta resultados dispersos para diversos radios del arreglo. Los métodos CCA ruido-compensado y no-compensado brindan resultados más robustos que el obtenido con el método SPAC para rango de longitud de onda larga por la compensación de ruidos incoherente en los datos (Tada, 2007).

El enfoque de inversión conjunta dependerá de la inversión del algoritmo genético (en inglés, GA) de la dispersión de onda de Rayleigh y la relación espectral H/V, determinará la confiabilidad de los resultados obtenidos. GA fue propuesto por Yamanaka e Ishida (1996), es un método de optimización no lineal que encuentra soluciones locales y globales simultáneamente usando diferentes modelos. Por lo tanto, la operación inversa se repite aleatoriamente y se utiliza un método probabilístico que intenta encontrar la solución óptima global. El algoritmo genético se define en función a la velocidad de la onda S y el espesor del estrato del suelo. (Arai & Tokimatsu, 2005) .

El objetivo de la realización del ensayo Arreglo de Microtremores, es realizar la exploración para grandes profundidades, de esta forma se podrá caracterizar dinámicamente para tener mejores resultados en el efecto de sitio. Las características dinámicas en función de las ondas S (V_S) y P (V_P), es la relación de Poisson (ν) que varía en función a las condiciones del terreno

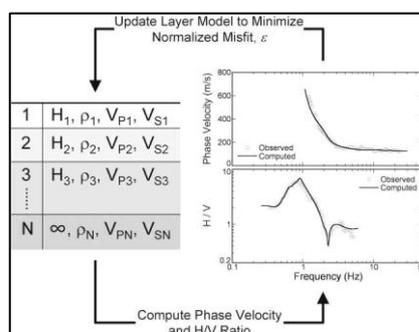


Figura N° 14: Diagrama esquemático de la inversión conjunta no lineal utilizando tanto la curva de dispersión como el espectro H/V. Tomado de Arai y Tokimatsu (2005).

2.2.5 Red Acelerográfica

Las estaciones acelerográficas permiten tener un vasto registro de acelerogramas de sismos de diferentes magnitudes, cuyo principal objetivo es tener un mayor conocimiento del comportamiento dinámico de los suelos para la elaboración de leyes de atenuación de ondas sísmicas. Además de permitir la realización de investigaciones que permitan actualizar y mejorar las normas actuales sismorresistentes, así como la delimitación de zonas con riesgos sísmico y las evaluaciones de respuesta en edificaciones o infraestructura ante eventos sísmicos severos. Las instituciones gubernamentales deben generar planes de prevención, mitigación y alerta ante desastres. Las redes acelerográficas en Perú está compuesta por las instituciones nacionales, en la actualidad se impulsa la ampliación de instrumentación de las redes acelerográficas.

Tabla N°11: Resumen de Acelerográficos Instalados. Tomado de Alva (2020)

INSTITUCIONES	Descripción
CISMID-UNI	38
SENCICO	15
POSGRADO FIC-UNI	31
CIP	35
CERESIS	04
IGP	113
TOTAL	236

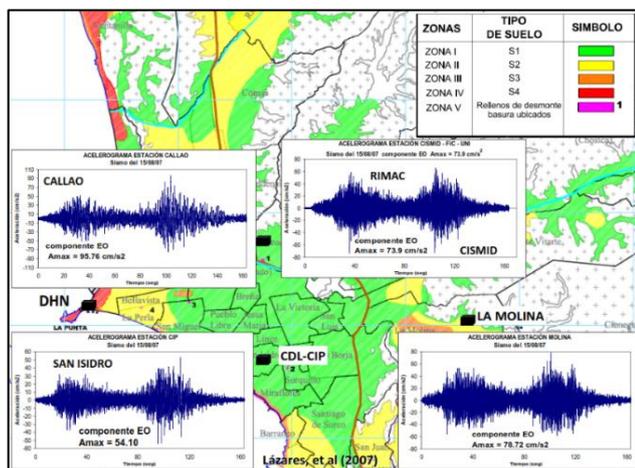


Figura N°15: Acelerogramas registrados en Lima en el Sismo 2007 Pisco. Tomado de Lazares (2007)

Acelerógrafo

Los acelerógrafos fueron desarrollados para registrar las señales sin saturarse, el movimiento fuerte del suelo ha permitido disponer de datos sísmicos de alta

frecuencia y ha favorecido extraordinariamente el estudio del proceso de fractura en el foco. La aceleración es un concepto de mayor utilidad por relacionarse directamente con la fuerza (Lazares, 2017). Un acelerógrafo consta de tres sensores que detectan el movimiento en dos componentes horizontales y una vertical; un sistema de discriminación de señales y un equipo de registro. El movimiento del suelo es transformado en impulsos eléctricos los cuales, después de ser amplificados, pasan al sistema de discriminación. En la actualidad se cuentan con centros de monitoreo en tiempo real el cual nos permite visualizar los registros tomados por cada acelerógrafo en cualquier tiempo y lugar.



Figura N°16: Acelerógrafo - Red Acelerográfica del CISMID-FIC-UNI.

Espectro de Respuesta

Los espectros de respuesta nos permiten identificar el comportamiento de las estructuras ante un movimiento sísmico, para el análisis utilizan un sistema de un grado de libertad con diferentes periodos de oscilación del cual se obtendrá la respuesta máxima por dicho movimiento sísmico que ha sido sometido. (Quito et al., 2021). El espectro de respuesta se puede obtener mediante el registro sísmico, el estudio de peligro sísmico y el análisis de respuesta de sitio (Soto & Alva, 2016).

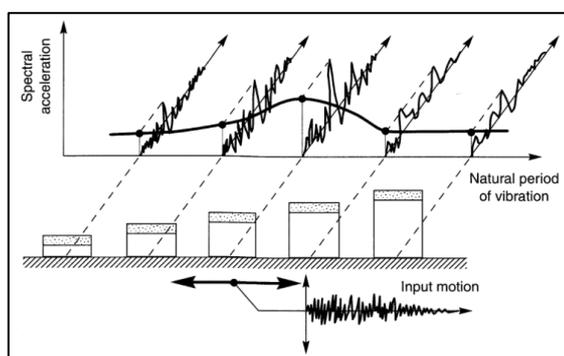


Figura N°17: Espectro de respuesta para distintos periodos de frecuencia. Tomado de Lazares (2017).

Espectro de Fourier

El Espectro de Amplitudes de Fourier del movimiento del suelo muestra como la amplitud del movimiento es distribuido con respecto a la frecuencia o periodo, el contenido de frecuencias de un movimiento. Un espectro angosto indica que el movimiento tiene una frecuencia dominante (o periodo) que puede producir un suave, casi sinusoidal tiempo-historia. Un espectro ancho corresponde a un movimiento que contiene una variedad de frecuencias que produce un dentado e irregular tiempo historia (Lazares, 2017).

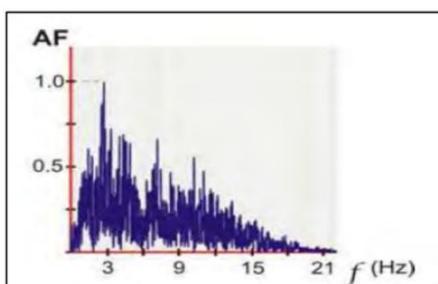


Figura N°18: Espectro de Fourier del terremoto del 31/05/1970 Perú. Tomado de Muñoz (2020)

Función de Transferencia

La función de transferencia permite estimar el efecto de las ondas Rayleigh. Nakamura propuso la teoría que los movimientos verticales (V_f) y horizontales (H_f) del suelo a nivel de superficie se puede interpretar como la suma de las ondas que viajan desde la roca y la contribución combinada de las ondas superficiales (Nakamura, 1989).

$$T_m(\omega) = \frac{T_h}{T_v} = \frac{\frac{H_f}{H_b}}{\frac{V_f}{V_b}} = \frac{H_f}{V_f} \quad \text{Ecuación 17}$$

2.2.6 ANÁLISIS DE AMPLIFICACIÓN SÍSMICA

La amplificación sísmica es la respuesta ante un evento sísmico generado por el suelo, debido a las condiciones de sitio lo que origina un cambio de comportamiento de las ondas que viajan desde la roca base hasta la superficie.

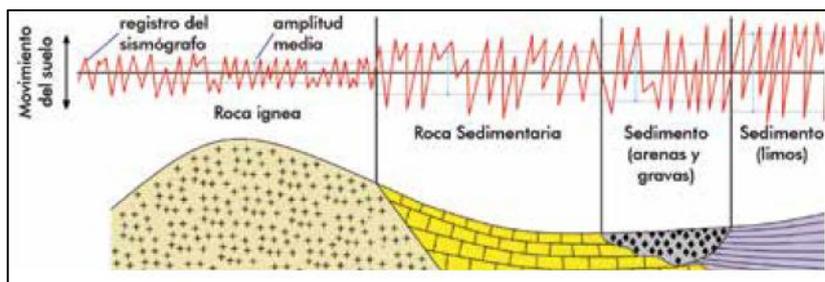


Figura N° 19: Variación de amplitud de onda al propagarse por diferentes tipos de suelo. Tomado de CENEPRED (2014)

El análisis de respuesta de sitio depende de distintos factores como: fuente sísmica, características del depósito de suelo. Cada fuente sísmica posee diferente contenido de frecuencias, amplitud y duración; dependiendo del depósito del suelo poseerá una estratigrafía, rigidez, profundidad del basamento, condiciones topográficas y comportamiento de materiales. A continuación, se presentan los dos métodos más utilizados en la actualidad:

- El modelo viscoelástico explica que, bajo una sollicitación de esfuerzo de corte, es posible separar una componente elástica caracterizada por el módulo de corte y otra componente de naturaleza viscosa (Verdugo, 2008).
- El análisis unidimensional de respuesta del suelo está basado en la suposición que todos los estratos son horizontales y que la respuesta del depósito del suelo es predominantemente causada por ondas SH propagándose verticalmente desde la roca base (Kramer, 1996).

La elección del método dependerá de las características del depósito a evaluar, en esta oportunidad para la presente tesis se empleará un Método Unidimensional Lineal Equivalente.

Método de Evaluación Unidimensional

El análisis unidimensional de respuesta del suelo está basado en la suposición que todos los estratos son horizontales (medio estratificado homogéneo en un espacio semi-infinito) y que la respuesta del depósito del suelo es predominantemente causada por ondas SH propagándose verticalmente desde la roca base (Kramer, 1996). A través de registros acelerográficos obtenidos de afloramientos de rocas, de sismos de magnitud considerable se evaluará la amplificación de la zona de estudio. El objetivo principal de emplear el análisis de

respuesta de sitio es obtener los espectros de respuesta mediante el análisis unidimensional.

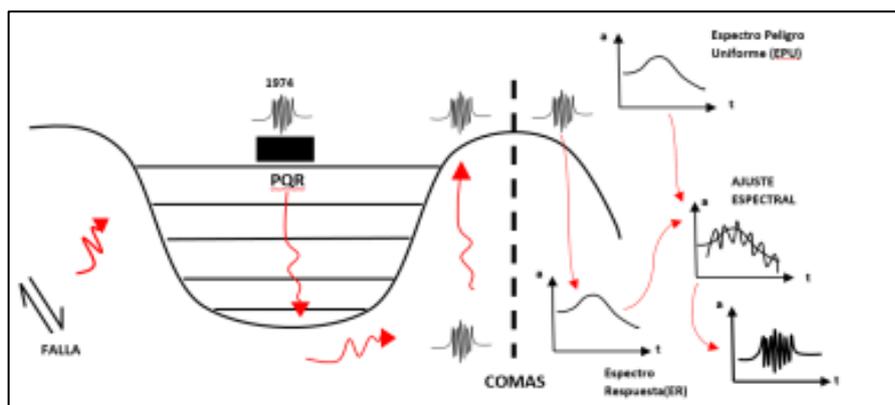


Figura N°20: Procedimiento para la obtención de aceleraciones y velocidades. Tomado de Tavera (2014).

Aki e Irikura (1991) recolecto información en Japón y Estados Unidos, concluyó que la respuesta del movimiento del suelo presenta una mayor influencia cuando está en el rango de periodo de 0.1 a 10 segundos. Además de que, para sismos generados a distancias espectrales de más de 50 km, los valores de aceleraciones máximas se verán fuertemente afectados por las condiciones locales de la geología a nivel superficial, siendo el alta la amplificación en suelos blandos y con rellenos (Aki & Irikura, 1991).

El comportamiento real del suelo es de tipo no lineal, como parte del análisis unidimensional se utiliza el modelo lineal equivalente de suelo. El comportamiento esfuerzo-deformación es representado en una curva histérica, relaciona esfuerzo cortante y deformación cortante unitaria para cada ciclo de carga. El módulo de corte es obtenido de la división del esfuerzo cortante entre la deformación cortante unitario. Las curvas de reducción del módulo cortante y el amortiguamiento son obtenidas a través de ensayos del laboratorio, este tipo de modificaciones nos permite obtener valores aceptables de la respuesta del suelo.

Este modelo asigna valores de módulo de corte y amortiguamiento a cada estrato según el nivel de deformación que éstos alcancen y según las respectivas curvas de reducción del módulo cortante y de variación del amortiguamiento. El nivel de deformación será inducido por un acelerograma de algún evento sísmico ingresado en la base del modelo, o donde sea razonable su ubicación, y se

buscará la respuesta en superficie debido al modelo de suelo generado (Sifuentes, 2012).

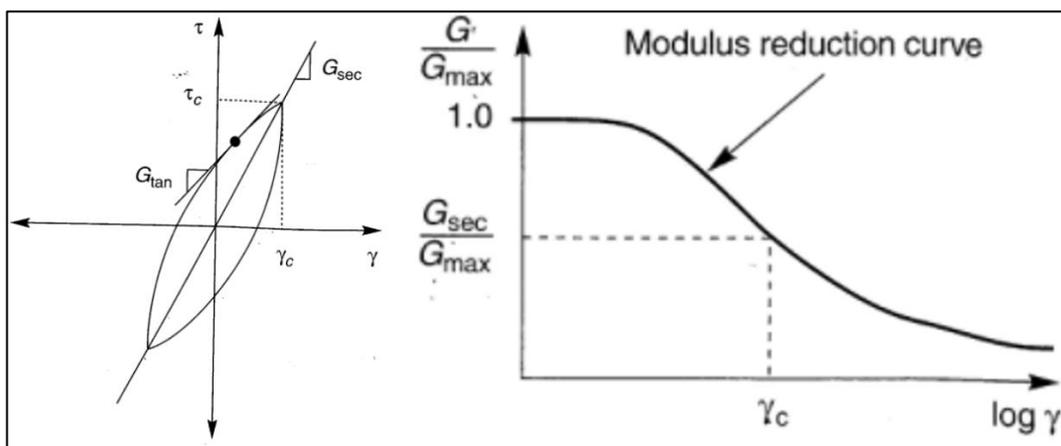


Figura N°21: Curva histórica de esfuerzo-deformación y Curva G/G_{max} vs γ . Tomado de Kramer (1996)

Los Modelos que se emplearan para el análisis Lineal Equivalente en la presente investigación son:

- Menq (2003) propone el análisis de las Propiedades dinámicas de suelos Arenosos y Gravosos. Identifica los parámetros fundamentales para el modelamiento del comportamiento del suelo como: coeficiente de uniformidad (C_u), Coeficiente Reposo (K_o), Numero de Ciclos (N) y Tamaño de Diámetro Medio de los granos (D_{50}). El Numero de Ciclos se recomienda tomar el valor de $N=10$, el cual es el valor promedio de los datos recolectados, a diferencia de un ciclo donde altera el método de vibración libre (Menq, 2003). Para la presente tesis se consideraron las curvas de módulo de corte normalizado y coeficiente de amortiguamiento de gravas en la zona de estudio. Por lo que se definió los valores de los parámetros de las gravas de la siguiente manera:

Carrillo (1979) realiza un análisis enfocándose en el comportamiento y resistencia del conglomerado de Lima considerado grandes espesores del perfil del suelo, teniendo como resultado rango de parámetros para el modelamiento: Peso unitario seco $180-2.2T/m^3$ y C_u de 10 -130. Debido al amplio rango de valores del Coeficiente de Uniformidad, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad de las curvas de amortiguamiento y reducción:

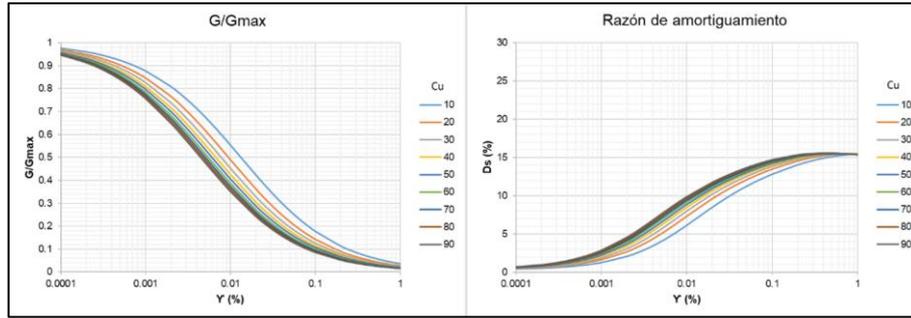


Figura N°22: Curvas de G/Gmax y Amortiguamiento-Análisis de Sensibilidad Cu – Elaboración Propia.

Se logra identificar el rango del Coeficiente de Uniformidad ($Cu \leq 30$) en donde las Curvas de Modulo de Reducción y Amortiguamiento no presentan un cambio significativo, razón por la cual se opta por emplear $Cu=20$. El Tamaño de Diámetro Medio de los granos (D_{50}) se considera 19 mm de acuerdo a exploraciones geotécnicas recolectadas.

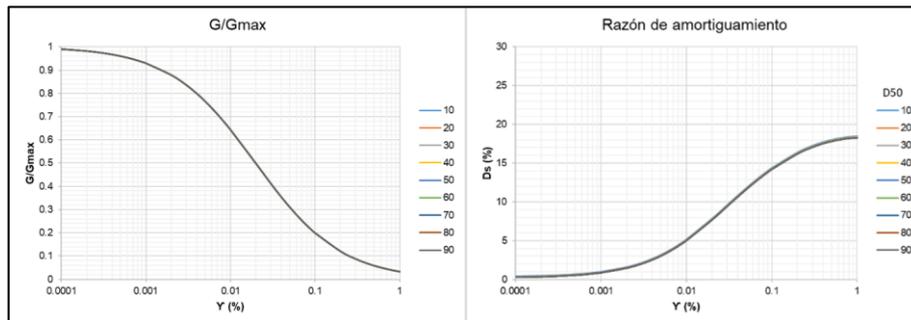


Figura N°23: Curvas de G/Gmax y Amortiguamiento-Análisis de Sensibilidad D_{50} – Elaboración Propia.

A diferencia del Coeficiente Reposo (K_o) que dependerá de la composición del suelo, se tienen identificadas formulaciones para Suelos Arenosos (Jáky, 1948) y Arcillosos (Brooker & Ireland, 1965) vamos a partir del supuesto que son suelos Normalmente Consolidados. Para los suelos como Limo, que no se tiene una formulación estimada se considerara del contenido de coloides (contenido de partículas de arcillas), para un contenido mayor de 20% a 25% se considerara como arcilla como se indica en la Carta de Plasticidad de Casagrande.

$$K_o = 1 - \sin \phi \quad \text{Ecuación 18}$$

$$K_o = 0.44 + 0.42 \left(\frac{IP}{100} \right) \quad \text{Ecuación 19}$$

Para gravas con profundidad considerable en donde no se cuente con estudios in situ se consideró la investigación de El caso de la Grava de Lima (Sánchez & María, 2016).

Shuan (2011) analiza la variación del ángulo de fricción con respecto a la mezcla de la grava con una matriz fina, variando solo el porcentaje de volumen de vacíos de la muestra inalterada. La muestra de la Matriz M.F. 1 (Collique-Comas) se realizó 7 ensayos para graficar la variación de los parámetros de resistencia en función a la matriz de finos.

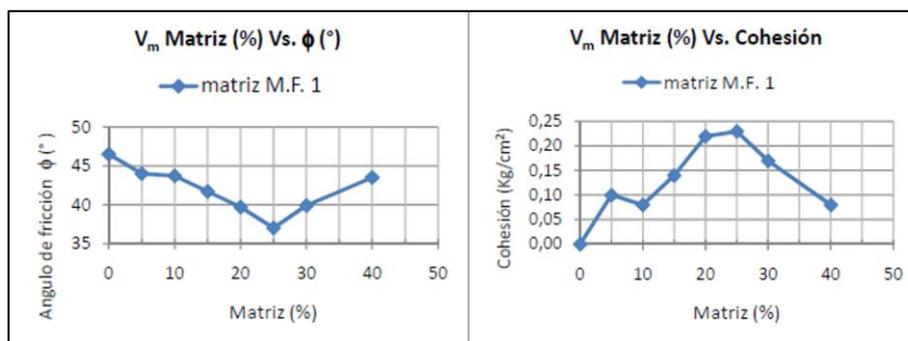


Figura N°24: Variación del ángulo de fricción interna y cohesión de la grava con el incremento de la matriz fina. Tomado de Shuan (2011)

Recolectando información de ensayos de corte in situ en Lima, se identificó el ensayo más próximo de la zona de estudio del 2005 en la Intersección Av. Izaguirre y Panamericana Norte con una profundidad máxima de 11 m los parámetros de resistencia $\phi = 40^\circ$ $c = 20kPa$ (Sánchez & María, 2016). Los parámetros de resistencia considerados para la zona de estudios son valores muy próximos, por lo que empleara en el análisis $\phi = 40^\circ$ $c = 20kPa$ considerando una matriz de finos del 20%.

- Zhang (2005) propone el análisis del Módulo de Corte Normalizado y Amortiguamiento de materiales de la Era Cuaternaria, Terciaria y de suelos residuales. Se basa en información de ensayos recopilados de Columna Resonante y Corte Torsional de más de 120 especímenes. Identifica los parámetros fundamentales para el modelamiento: Esfuerzo Cortante (γ), Parámetro de Ajuste de Curvatura (α), Corrección de Tensión (k), Índice de Amortiguamiento Mínimo (D_{min1}) y Índice de Plasticidad (IP).

Para la presente tesis se considera el modelo de Zhang en los depósitos cuaternarios (suelos arenosos y arcillosos) identificados en la zona de estudio. Se empleará los valores promedios recomendados, tomando como referencia los estudios recopilados en la zona de estudio.

Tabla N°12: Valores Promedios Recomendados. Tomado de Zhang (2005)

Geologic age	Number of specimens	Variable	Plasticity index, (PI)					R^2	
			0	15	30	50	100		150
Quaternary	8	α	0.83	0.87	0.90	0.94	1.04	1.15 ^a	G/G_{max} : 0.792 D : 0.804
		k	0.316	0.255	0.207	0.156	0.077	0.038 ^a	
		γ_{r1} (%)	0.075	0.092	0.108	0.130	0.186	0.241 ^a	
		$D_{min 1}$	0.82	0.94	1.06	1.23	1.63	2.04 ^a	
Tertiary and older	66	α	1.03	1.04	1.05	1.07	1.11 ^a	— ^c	G/G_{max} : 0.841 D : 0.868
		k	0.316	0.268	0.227	0.182	0.105 ^a	—	
		γ_{r1} (%)	0.031	0.037	0.043	0.051	0.072 ^a	—	
		$D_{min 1}$	0.82	0.94	1.06	1.23	1.63 ^a	—	
Residual/saprolite soil	48	α	0.79	0.86	0.92	1.01 ^a	—	—	G/G_{max} : 0.930 D : 0.882
		k	0.420	0.212	0.107	0.043 ^a	—	—	
		γ_{r1} (%)	0.039	0.053	0.067	0.086 ^a	—	—	
		$D_{min 1}$	0.82 ^b	0.94 ^b	1.06 ^b	1.23 ^b	—	—	

- MKZ (Modified Kondner and Zelasko) es producto de la modificación del modelo KZ realizado por Matasovic y Vucetic (1993). Tenía como objetivo que el modelo abarcara un rango amplio de deformaciones de corte, se basa en formulaciones para predecir el comportamiento del suelo (Soto & Alva, 2021)

Se moldeará el comportamiento elástico del suelo clasificado como Roca (B) de acuerdo a la normativa del IBC (2015) con $1500 \geq V_s \geq 760$ m/s. El cual restringe el rango de valores del módulo de corte normalizado para representar el comportamiento real de un suelo muy rígido o Roca en función al porcentaje de deformación, el cual ha sido extraído del software Shake e ingresado en el programa Deepsoil.

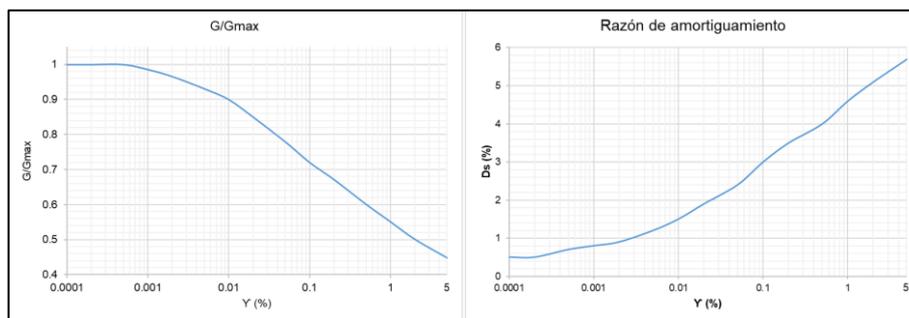


Figura N°25: Curvas de G/G_{max} y Amortiguamiento, Comportamiento Elástico – Adaptado Software Shake

Los factores que influyen en el daño estructural durante los terremotos son las características de la fuente, las condiciones locales del suelo y las características estructurales. Las intensidades de movimiento sísmico y el contenido de frecuencia son afectados por las condiciones geológicas y geotécnicas locales.

Los sismos que ocurren en zonas con alta sismicidad afectan ampliamente la vida humana al causar enormes pérdidas económicas y de vida.

Como se sabe claramente, las propiedades dinámicas y el comportamiento de los estratos del suelo varían con respecto al nivel de esfuerzo de corte inducido, el cual es una característica importante para el diseño de estructuras sismorresistentes.

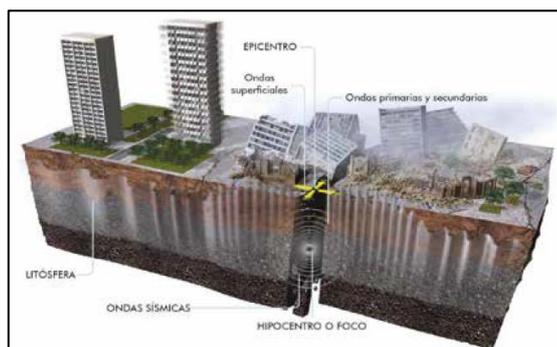


Figura N° 26: Efectos de ondas sísmicas en edificaciones. Tomado de CENEPRED (2014)

2.2.7 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Los mapas de microzonificación sísmica consideran las condiciones de sitios que están dentro del área de estudio (geología, sísmica, topografía, efectos de amplificación, inestabilidad de taludes y efectos de la licuación). Para realizar la zonificación sísmica es necesario los mapas de peligro geológico, geotécnico, Isoperiodos, Vs30, pseudoaceleraciones obtenida del peligro sísmico y factores de amplificación. La superposición de la información recolectada permite obtener el Mapa de Microzonificación Sísmica Moderna donde se identifica las zonas con diferentes comportamientos ante un sismo determinando el que genera un mayor daño en la infraestructura, y por lo tanto identificar las áreas donde se tendría que tomar medidas de prevención y mitigación pertinentes (CISMID, 2011).

La microzonificación sísmica puede ser una tarea difícil y costosa dependiendo del método empleado. Estos mapas están integrados en un sistema de información geográfica. El Sistema Integración Geográfica (SIG) permite obtener información áreas intermedias o inaccesibles para estudios y correlaciona datos de diferentes análisis. Además, permite incorporar diferentes mapas y combinarlos para obtener análisis de Microzonificación Sísmica con una sola herramienta gráfica. La microzonificación proporciona la base para el análisis de riesgo específico del sitio, que puede ayudar a mitigar los daños por terremotos.

CAPÍTULO III: PELIGRO GEOLÓGICO Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

3.1 INTRODUCCIÓN.

La evaluación geológica fue realizada en gabinete con la información disponible en el INGEMMET y otras entidades, el área de estudio se ubica en el Cuadrángulo Geológico de Chancay (24-i) y Chosica (24-j). Se describe los aspectos geomorfológicos, geológicos, litológicos, hidrogeológico y geodinámica. La importancia de la identificación de zonas vulnerables a posibles peligros geológicos, permite la planificación de mitigación de riesgos de los distintos sectores, estos incluyen la problemática de inundación, huaycos, desprendimientos o deslizamiento en caso de eventos extraordinarios como el del Fenómeno del Niño o eventos sísmicos. Estos eventos son perjudiciales para el hombre, la intervención humana puede aumentar la frecuencia y severidad de los peligros e incluso generar peligros que no existían antes.

Para la elaboración de caracterización geotécnica se utilizó información recopilada de instituciones públicas y privadas, que tuvieran información de exploraciones geotécnica y sus resultados de perfiles estratigráficos. Asimismo, se analizó el ataque químico por suelos y aguas subterráneas. La identificación del nivel freático se realizó de registros de pozos y exploraciones recopiladas, para una mejor comprensión de zonas susceptibles a asentamientos por descenso del nivel freático. La sectorización de la microzonificación geotécnica se realizó con base en los mapas de suelos de 1.0 m y 2.5 m de profundidad, y el cálculo de capacidad de carga admisible.

3.2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

La caracterización geológica se realizó en toda el área de estudio, teniendo principal énfasis en la zona potencialmente peligrosas debido a la presencia de edificaciones en las laderas de los cerros con pendientes pronunciadas ubicadas del lado derecho de la avenida principal de la Túpac Amaru. Se realizó la delimitación de zonas con características litoestratigráficas similares, además de identificar inestabilidad de taludes existentes, y donde pueda ocurrir fenómenos de geodinámica externa. Toda la Información geológica es de información

recopilada del INGEMMET de diferentes publicaciones como: boletín (INGEMMET, 1992), informes (INGEMMET, 2015), mapas y pagina web.

3.2.1 Aspectos Geomorfológicos

El Rio Chillón es uno de los abanicos de deyección cuaternario de Lima, enmarcado en rocas sedimentarias del Jurásico Superior al Cretáceo Inferior y de rocas intrusivas del Batolito Andino. Los sedimentos del rio están compuesto de material fino y gravas, con material arcilloso a profundidad. Se identificaron los aspectos geomorfológicos en el área de estudio, son consecuencia de la geodinámica externa, pertenecientes a eventos plutónicos y tectónicos.

Cono de deyección

Zonas planas predominantes y con lomadas, el cual constituye una llanura aluvial para el acarreo de materiales. El colchón aluviónico en el bajo Comas se debe a varias condiciones, como cambio de curso de rio o divagaciones.

Valles y Quebradas

El valle del Rio Chillón delimita la frontera con el distrito de Puente Piedra, las quebradas por otra parte presentan escasa ocurrencia de agua debido a las condiciones climáticas del área de estudio, a excepción de fuertes precipitaciones asociadas al Fenómeno del Niño ocasionando de manera violenta fenómenos geodinámicos.

Estribaciones de la Cordillera Occidental

La topografía abrupta predomina en las laderas y crestas marginales pertenecientes a la cordillera andina, ubicada en el límite distrital con San Juan de Lurigancho. Formada por plutones y el batolito costero, con formas abruptas por paso de río y quebradas.

Cerros y Colinas

Unidades litológicas que se encargan de separar las estribaciones y planicies. Presenta taludes cubiertos de material eólico (arenas), que fueron invadidas por la población. Conformada por rocas volcano-sedimentaria, calizas, lutitas intercaladas con derrame volcánico e intrusivas con cuerpos de granito.

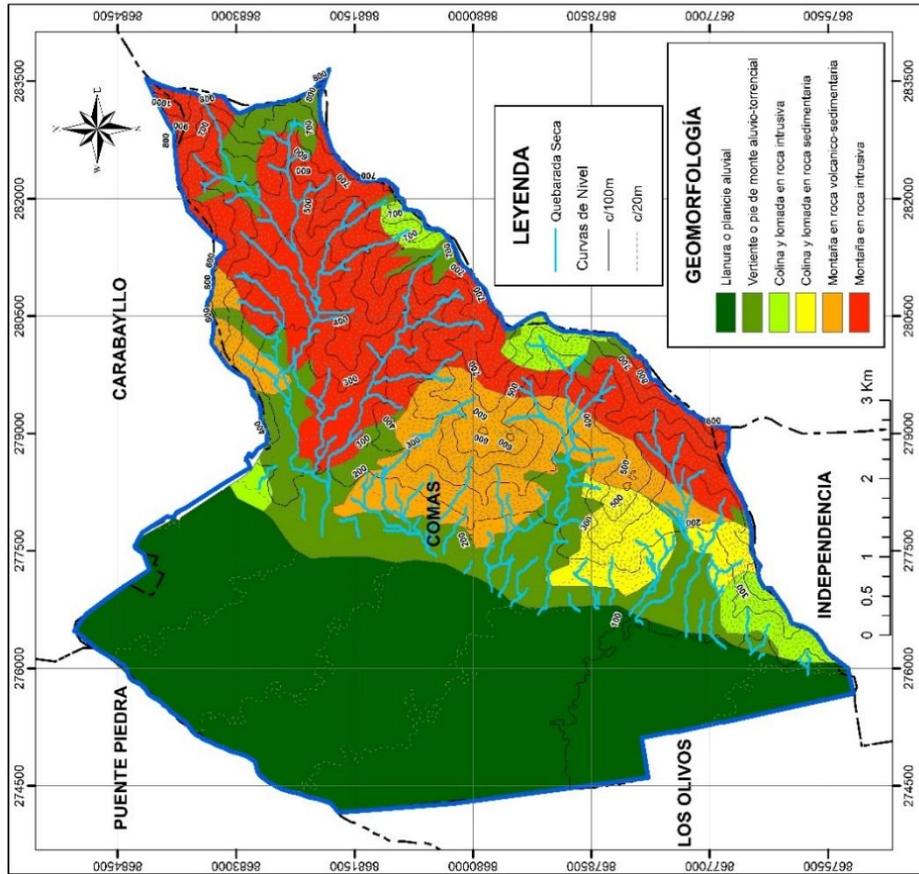


Figura N° 27: Mapa Geomorfológico - Adapto del INGENMET.

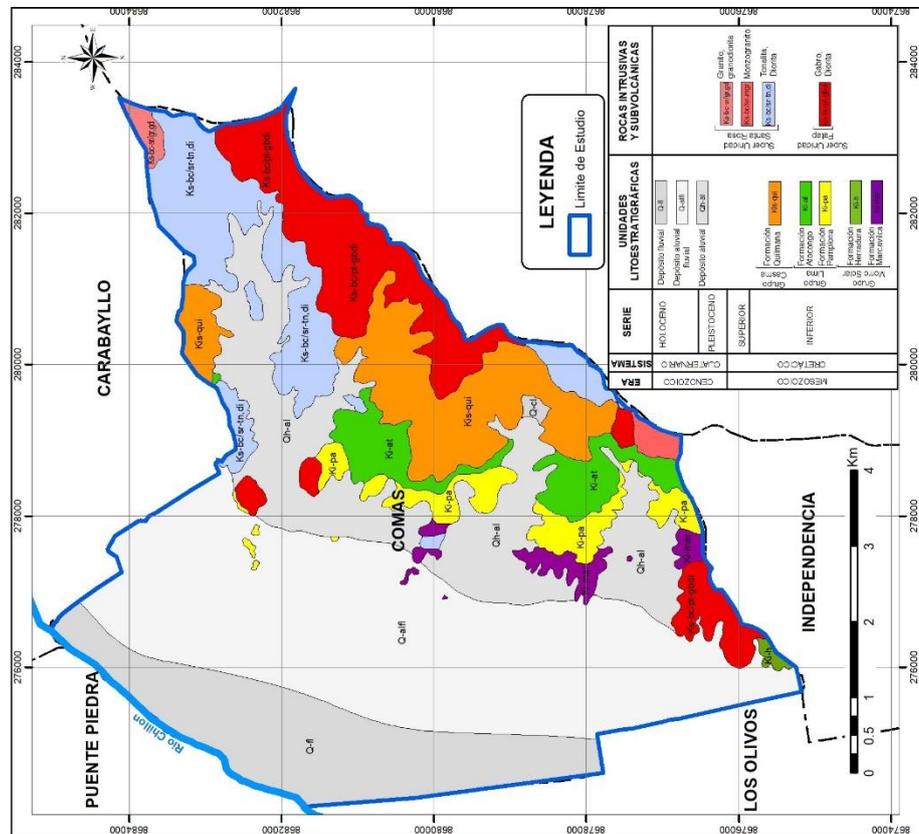


Figura N° 28: Mapa Geológico - Adapto del INGENMET.

3.2.2 Aspectos Geológicos y Litológicos

La geología local es muy variada, debido a la presencia del material depositado de varias edades como Cretáceo Inferior, Superior y Cuaternario. Los depósitos aluviales de régimen aluvional como del río Chillón, presenta composición heterogénea (superposición de diversos abanicos de deyección) por los diversos regímenes de descarga y la capacidad variable de transporte de materiales. Los sedimentos del río Chillón son más finos y las gravas son de origen volcánico, el material aluvial se hace más arcilloso en profundidad. Los depósitos aluviales pueden tener un grosor de 400 a 600 metros de relleno aluvial.

Formación Pamplona (Ki-pa)

Es una unidad plástica ubicada en el sector intermedio y alto del valle del cretáceo inferior, con características arcillo-calcárea, predomina la arcilla y calizas de la formación Atocongo con potencia entre 160 a 200m. Se ubica en el flanco oriental del anticlinal del margen izquierdo del río Chillón, cuenta con pliegues de arrastre, estructuras de sobrecarga, microplegamientos y esquistosidad (recristalización parcial laminar paralelos a los planos axiales de los pliegues) de fractura. Litológicamente lo conforma calizas grises oxidadas intercaladas, con lutitas gris verdosas de disyunción astillosa y margas con material carbonoso variable.

Formación Atocongo (Ki-at)

Es la continuación de la Formación de Pamplona con una profundidad de 400 m, donde sus facies del cretáceo inferior (conjunto de rocas sedimentarias o metamórficas) varían de arcillo-calcárea a calcárea. Se ubica en el flanco oriental del anticlinal, aflorando desde la zona Norte de Carabayllo hasta las partes altas de Comas. Litológicamente lo conforma calizas afaníticas (grano fino) gris plomizas y calizas macizas margosas de espesores de 5 a 10 cm, calizas metamorfizadas afaníticas de tonalidad oscura de espesor considerable y bancos de calizas silicificadas.

Formación Morro Solar (Ki-ms)

Los afloramientos de la formación Morro Solar se extiende desde Chorrillos hasta el valle del Chillón, esta subyace la formación Pamplona. Litológicamente lo

conforma un cambio gradual de facies arcillosas a areniscas, luego pasa a cuarcitas interestratificadas con niveles limolíticos gris verdoso.

Formación Marcavilca (Ki-mar)

Formación perteneciente al Grupo del Morro Solar cuyo grosor varía entre 100 a 120 m, descansa en contacto normal sobre la Formación Herradura y subyace a la Formación Pamplona. Compuesta por rocas competentes, duras y compactas de todo el grupo. Cuya litología presenta buena granulometría, predomina la cuarcita gris blanquecina de grano grueso.

Super Unidad Patap (Ks-gbdi-pt)

Conforma el batolito de la zona (la más antigua) de las rocas intrusivas, unidad del cretáceo superior compuesta por gabro y diorita. Coloración oscura por la presencia de magnesianos en la roca de granulometría gruesa a muy gruesa, característica por la inestabilidad por disturbaciones.

Super Unidad Santa Rosa (Ks-bc)

Conformada por cuerpos oscuros (tonalíticos-dioríticos) y claros (tonalítico-granodioríticos) guardan consanguinidad química, textural y de emplazamiento. Santa Rosa oscuro lo constituye el plutón, color gris oscuro, textura holocristalina de grano medio variado a grueso. El cambio de tonalidad se debe a la disminución del cuarzo y aumento de ferromagnesianos.

Deposito Fluvial (Q-fl)

Deposito no consolidados producto del transporte por un medio fluvial (Río Chillón), genera una terraza fluvial conformada por arcillas y limos depositados laminarmente. Se identificó desde la Hacienda Chacracerro hasta el sur la presencia de sedimentos arcillosos y limosos con estratificaciones de hasta 4 m que descansan sobre depósitos de conglomerado. Cantos rodados, arenas y limos conformando barras en las márgenes del río Chillón

Deposito Aluvial Fluvial (Q-alf)

Se desarrollan pampas con pendientes de hasta 3° conformados por materiales sedimentarios compuestos de clastos irregulares angulosos de diámetro menor a

0.5m., que presentan secuencias clásticas granos decrecientes. Gravas, arenas y limos conforman las llanuras planas en el valle Chillón

Deposito Aluvial Holoceno (Qh-al)

Depósitos restringidos en franjas estrechas del Rio Chillón, con terrazas en donde predominan cantos y gravas sub-redondeados con buena granulometría en matriz arenosa, además considera depósitos fluvioaluviales muy pedregosos. Descansan sobre superficies irregulares del abanico coluvial y su contacto superior es erosivo sobre el que vienen depósitos de flujo de escombros posteriores.

3.2.3 Marco Hidrogeológico

La identificación de reservorios acuíferos a través del Mapa Hidrogeológico es importante, en zonas altas se cuenta con acuíferos fisurados o fracturados. A diferencia de acuíferos porosos no consolidados y costeros en los pisos de los valles que evidencian fuentes de agua subterránea (manantiales, fuentes, pozos, galerías filtrantes y otros). El abanico del rio Chillón presenta una napa de pendiente algo menor (V: H de 1.80), cuya profundidad varía entre menos de 5 m (Aeropuerto-Cero La Regla-Río Chillón-Puente Piedra-Chuquitanta-Hacienda Aznapuquio) y 40 m (al NE de Carabayllo), el material aluvial posee características permeables (grava, arena) y lentes de capas arcillosas, se puede visualizar más de un nivel freático.

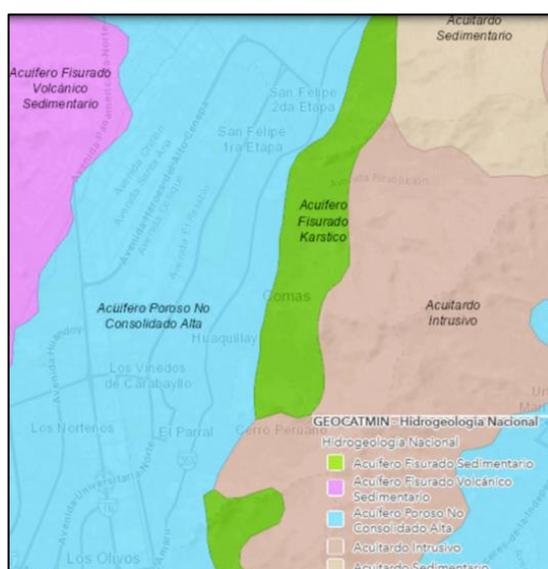


Figura N°29: Mapa Hidrogeológico del Distrito de Comas. Tomado de INGEMMET (2020)

3.2.4 Procesos Geodinámicos Externos

Los fenómenos Geodinámicos Externos son una fuente de riesgo constante para la población, dependerán del grado de afectación y predominancia de eventos. A continuación, se explicará posibles eventos que pueden suceder:

Deslizamientos

Posee variables características como magnitud, tipo de material y volumen. El movimiento de estas masas de tierra se deberá a la generación de superficies de falla donde el material se deslizará.

Derrumbes y caídas de bloques

Predominan en depósitos de materiales no estratificados (depósitos coluviales y metamórficos) generando desprendimiento del material. Mallma (2019) evaluó el área de influencia de deslizamiento de rocas en el AAHH Año Nuevo concluyendo que el recorrido máximo de las rocas es de 280 m, cuyo origen geológico corresponde a la Formación Quilmana con topografía abrupta para diversas formas de rocas.

Deslizamientos de Flujos de Material

Ocurre ante la presencia de aumento de precipitaciones pluviales, grandes flujos de material poco consolidado de laderas y quebradas son desplazadas de manera rápida.

3.2.5 Análisis de Pendientes

Comas presenta zonas con muy alta susceptibilidad a movimientos de masas en las zonas de fuertes pendientes, conforme ocurre un decremento de pendiente en la zona de estudio disminuye la probabilidad de ocurrencia de movimiento de masas en zonas de planicie. Factores característicos para la ocurrencia de movimientos de masas son las zonas de falla, masas de roca intensamente meteorizadas, saturadas y muy fracturadas, con discontinuidades desfavorables con pendientes entre 30 a 45°. La erosión de laderas en la mayor parte de la zona de estudio es nula, presencia baja y media en zonas puntuales de alta pendiente, en donde se presentan materiales sueltos e inestables que presenta baja competencia geomecánica en los materiales aflorados.

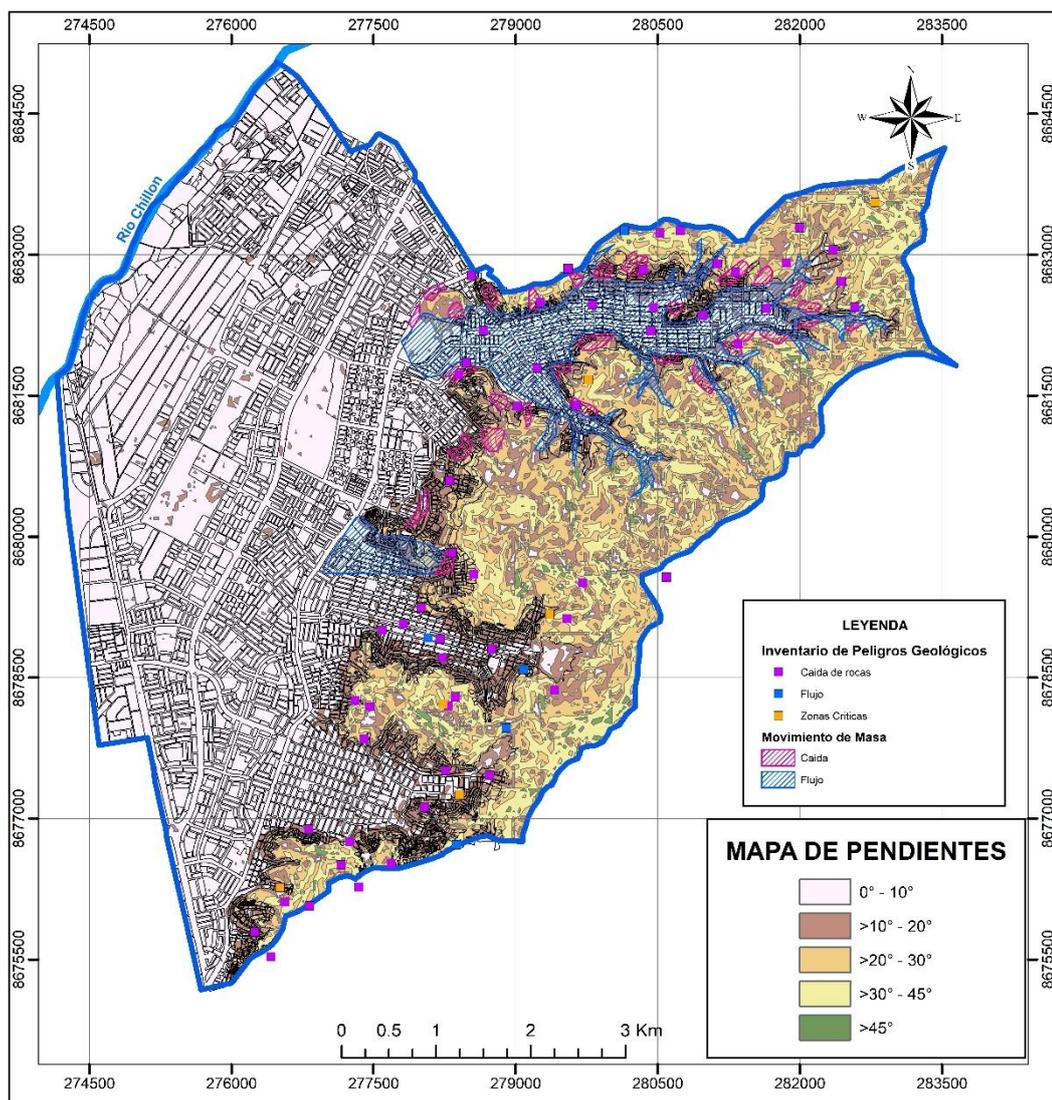


Figura N°31: Mapa de pendientes con el Inventario de Peligros Geológicos y Movimientos de Masa – Adaptado INGEMMET.

Se describe los peligros geológicos identificados, junto con un breve enfoque en su vulnerabilidad y recomendaciones para mitigar o eliminar dicha vulnerabilidad.

Tabla N°13: Inventario de Peligros Geológicos. Tomado de Fidel (2006), INGEMMET (2009 y 2010)

Paraje Sector	Descripción	Vulnerabilidad y/o Daños Ocasionados	Recomendaciones
Collique 8va/7ma. Zona	Ocurrencia de posibles caídas y derrumbes. Laderas con pendientes pronunciadas y bloques sueltos en la cima que pueden ceder ante un movimiento sísmico. Identificación de depósitos de material irregular de diversos tamaños, que alimentan los pasos de las quebradas. Viviendas	Viviendas vulnerables por caídas de rocas o movimientos sísmicos. Taludes de la zona altamente colapsable, las pircas pueden afectar las viviendas y vías de acceso.	Reubicar viviendas expuestas a bloques sueltos o canchales. Reforzar zonas que se pueden derrumbar con muros de contención. Liberar pasos de

Paraje Sector	Descripción	Vulnerabilidad y/o Daños Ocasionados	Recomendaciones
	precarias y vías de acceso deficientes sobre terraplenes o pircas, potencialmente colapsable por paso de cisternas de agua o ante sismos de magnitud considerable.		quebradas y causes para evitar futuros daños.
AA.HH. Ampliación La Merced AA.HH. 2 de mayo Cerro Sinai Proyecto Integral 2000 AA.HH. Cristo Rey AA.HH. Nueva Unión	Presencia de bloques de sueltos no mayores a 1.5 m, y canchales, pueden generar caídas. Trayectoria de arrastre de 50 a 100m de largo, 50 m de altura y con pendiente entre 25° a 45°. Litología intrusiva predomina.	Sectores vulnerables en las laderas, gran exposición de asentamientos por caídas y derrumbes, junto con desprendimientos de grandes rocas.	Construcción de muros de contención, despejar bloques sueltos de las laderas, evitar futuras construcciones e incentivar vías de evacuación.
Comité 39 – Sector Progreso	Viviendas susceptibles a hundimientos y colapso, debido a que se encuentran asentadas en rellenos no ingenieriles	Viviendas afectadas por asentamientos, futuro colapso.	Reubicar y no permitir futuras construcciones.
Libertad/ Soledad/ Pascana	Viviendas conformadas por 5% ladrillo y 95% otro material. En zona de expansión prohibida o no recomendable. Laderas con depósitos coluviales, residual o volcánico. Ubicada en la Quebrada de Collique	Caídas de rocas con sismos. Presencia de rocas sueltas en las laderas. Peligro Medio y Alto, respectivamente.	Vulnerabilidad muy alta por cimentación precaria en zonas inestables.
Collique (3ra, 4ta y 5ta Zona)			
Aychama	Viviendas de tapial, en zona no recomendable mayormente usados cultivos, ganadería. Cono deyectivo, pluvial, aluvial.	Medio a alta peligrosidad por presencia de erosión fluvial, aluvión y sismos. En 1947 gran cantidad de muertos, heridos y viviendas destruidas.	
Villa Los Jardines Víctor Raúl Clorinda Prado La Libertad Carmen Alto Micaela Bastidas Virgen del Carmen Cerro Morado Cerro Libertad AA.HH. San Francisco Cerro de Pasco Nuevo Amanecer Los Libertadores Sierra Nuestra Año Nuevo parte alta 27 de noviembre Aposento Alto 28 de Julio Sagrada Familia AA.HH. Señor de los Milagros Virgen de Las Nieves Amazonas Sierra Maestra AA.HH. San Joaquín AA.HH. 1ro de Junio	Caída de rocas y derrumbes. Viviendas cimentadas sobre pircas de piedra (muros secos), en laderas de fuerte a muy fuerte pendiente. Bloques sueltos en laderas inestables con incentivación sísmica.	Viviendas ubicadas al pie de las laderas.	Mejorar los cimientos de las viviendas; no permitir el crecimiento urbano hacia la parte alta de los cerros

Zonas potencialmente inundables como el sector San Diego, cada año se efectúa limpieza de cauce. El Fenómeno del Niño del 2017 genero daños por el desborde del Río Chillón en el Puente Tambo Río, colapsando 20 viviendas e inunda las Asociaciones La Hacienda, Panamericana y Asociación San Juan.

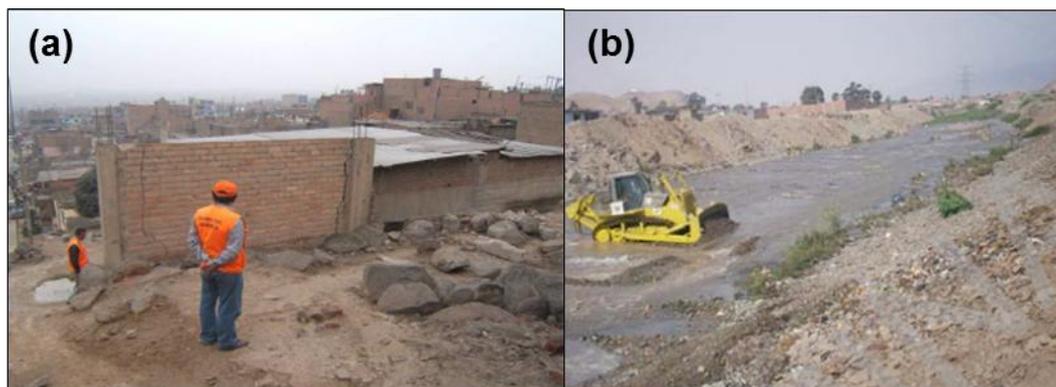


Figura N°32: (a) Sector La Cumbre. Chaperito (Asentamientos) (b) Remoción de material del cauce del Río Chillón – San Diego. Tomado de INGEMMET (2009 y 2010)

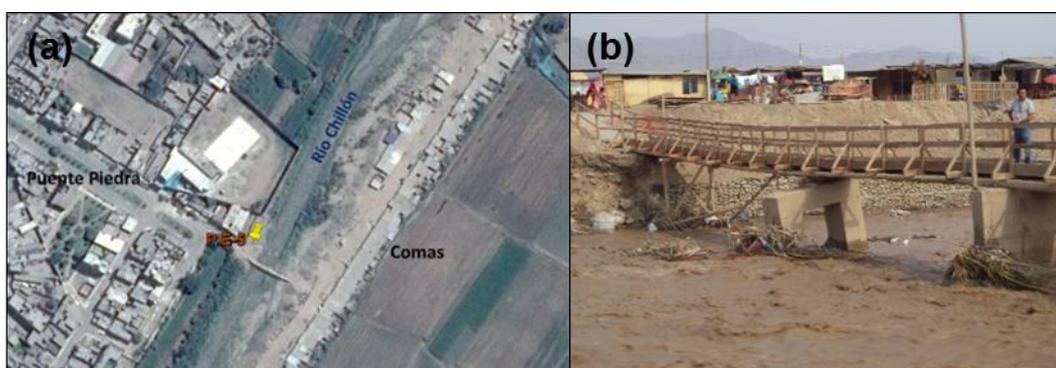


Figura N°33: (a) Ubicación de Gallinazo (b) Puente peatonal inestable del sector Gallinazo. Tomado de CISMID e IMEFEM (2017)



Figura N°34: (a) Viviendas colapsadas e inhabilitadas debido a la erosión (b) Ladera protegida por una geomembrana y gaviones. Tomado de CISMID e IMEFEM (2017)

CISMID (2017) realizó una evaluación de daños en la zona Gallinazo (límite entre Comas y Puente Piedra), un puente peatonal quedó inestabilizado, debido a que el suelo de fundación estaba constituido de desmonte el cual fue erosionado fácilmente; además ocasiono colapsos de viviendas e inhabilitando otras. El límite

del distrito de Comas presenta protección aguas abajo con geomembranas y gaviones (20m de longitud y 3 m de altura). Se concluye la existencia de peligros geológicos de erosión fluvial e inundaciones en la zona de estudio en la ribera del río Chillón.

3.3 MAPA DE PELIGROS GEOLÓGICOS

La zona de estudio se encuentra conformado geomorfológicamente por cono de deyección, valles, quebradas, estribaciones, cerros y colinas. Las rocas están compuestas por intrusivas, volcánicas, sedimentarias o metamórficas, predomina la composición calcárea. Mediante información hidrogeológica se logró identificar reservorios acuíferos, y la fuente de agua subterránea en la planicie de la zona de estudio. Los procesos Geodinámicos externos identificados son los de caídas de rocas (predominante), huaycos o flujos, deslizamientos y movimientos de masas. Daños por desborde del río Chillón puede suceder en la zona de estudio a pesar de poseer defensas ribereñas por sectores y plan de manejo de materiales en el cauce del río.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se evaluó todos los posibles peligros existentes y por haber en el área de estudio, para la elaboración de un mapa de peligros geológicos.

3.3.1 Peligro Muy Alto

Se delimito la zona de Peligro Geológico Muy Alto tomando en consideración la información antes mencionada. El distrito de Comas se caracteriza por presentar material que proviene de la Formación Quilmana – Grupo Casma (Kis-qui) con pendientes fuertemente inclinadas (30 - 50%) y material disgregado, por lo que se hace extensiva la conclusión de Mallma (2019) a toda el área de estudio la alta susceptibilidad de caídas de rocas de las cumbres, en especial ante la alta sensibilidad sísmica. Teniendo en cuenta que dicho fenómeno dependerá de diversos factores como tamaño, peso, forma, origen y ubicación de las rocas, así como la topografía de su recorrido.

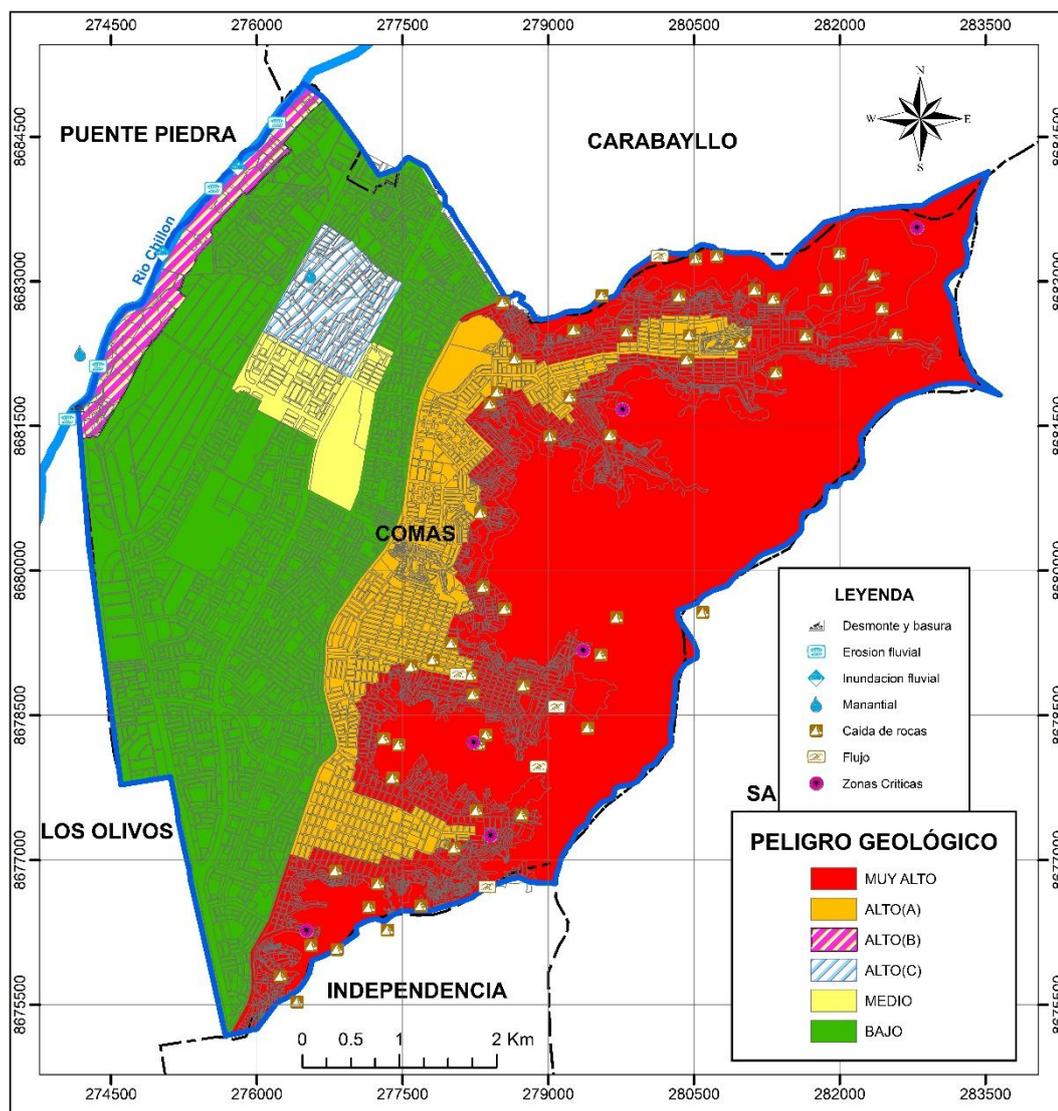


Figura N°35: Mapa de Peligros Geológicos del distrito de Comas – Elaboración Propia.

3.3.2 Peligro Alto

El Peligro Geológico Alto se divide de acuerdo a su origen en los siguientes:

- A. El Peligro geológico que predomina el movimiento de masas (flujo de lodos o huaycos) en diversos asentamientos humanos y pueblos jóvenes que ocupan las laderas de los cerros. Las quebradas secas son activadas antes la ocurrencia del Fenómeno del Niño, neblinas y garuas en distintas intensidades. Además, que en la zona delimitada puede presentar derrumbes (AA.HH. 11 de Julio, La Juventud, Carmen Alto y El Misti), desprendimientos y actividad eólica intensa.

- B. Zona Inundable en épocas de lluvias extraordinaria (Fenómeno del Niño), generando erosión en la ribera del río, así como daños a edificaciones presentes sobre material de relleno (altamente erosionable) o cerca del lecho del río. El cauce del río a lo largo de la zona de estudio (4 Km) (ANA, 2018) es afectado por la presencia de relleno de desmonte, residuos domésticos o industriales depositados. Es importante mencionar que el nivel del cauce natural del río no siempre es inferior al nivel del asentamiento humano, por lo que los daños generados en estos sectores son más sensibles al aumento del volumen del agua o estrechamiento del lecho. La medida de mitigación aplicada es la limpieza del cauce, de manera periódica y cuenta con protección ribereña cerca de estructuras importantes (puentes), las medidas son limitadas conforme el presupuesto disponible de la municipalidad.
- C. Delimita la zona crítica afectada por el afloramiento de agua subterránea, debido a la presencia de un manantial, en el pasado se usaban sistemas de galerías subterráneas para abastecer de agua potable a dichos sectores, de este modo controlando el nivel freático. La clausura de los pozos de la zona en el año 2001 ocasiono la recuperación del nivel freático, generado daños severos en las infraestructuras por reducción en la capacidad portante del suelo por presencia del agua. La medida de contención aplicada el 2008 fue la instalación de un sistema de drenaje de las aguas subterráneas al Parque Sinchi Roca, controlando los asentamientos del suelo. En ente encargado del monitoreo del nivel freático es SEDAPAL (Consortio Nippon Koei, 2009).

3.3.3 Peligro Medio

El Peligro Geológico Medio es el asentamiento ocasionado por la elevación del nivel freático, la presencia de suelos blandos puede generar asentamientos diferenciales afectando las viviendas o infraestructura presente.

3.3.4 Peligro Bajo

El Peligro Geológico Bajo está constituido por la planicie y el cono de deyección, cuya composición geológica son depósitos aluviales. El sector agrícola, industrial y urbano lo conforma, la zona urbana presenta alta demanda de población.

3.4 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

3.4.1 Información Recopilada

La información obtenida fue recopilada de entidades públicas y privadas como: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID-FIC-UNI), Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL), Consultoría Jorge E. Alva Hurtado y ZER Geosystem Perú S.A.C. Se logró recopilar ensayos esenciales para la caracterización del suelo como el de calicatas, perforaciones, ensayo SPT y CP.

Exploración de Campo

En su conjunto, se logró recopilar 218 puntos de exploración geotécnica, que lo comprenden 151 calicatas, 07 sondajes del ensayo de Auscultación Dinámica con el Cono Peck (CP), 10 sondajes del ensayo de Penetración Estándar (SPT) y 50 perforación de pozos. Todas las exploraciones geotécnicas recopiladas fueron georreferenciadas en el sistema de proyección de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), para un mejor análisis espacial al momento de generar los mapas de microzonificación geotécnica.

Ensayo de Calicatas

Las 151 calicatas recopiladas tienen un rango de profundidad de 1.50 a 9.00 m, estas exploraciones nos permite tener una observación directa del terreno e información de las muestras de suelo analizadas en el laboratorio. Se presentó nivel freático en las calicatas CR-94 y CR-95 a 4.50 y 4.70 m de profundidad respectivamente.

Tabla N°14: Resumen de Información Recopilada Calicatas – Elaboración Propia

Nº	Profundidad de Exploración (m)	Cantidad
1	Menor a 2	2
2	2 a menos de 3	12
3	3 a menos de 4	36
4	4 a menos de 5	79
5	5 a menos de 6	13
6	6	2
7	9	7

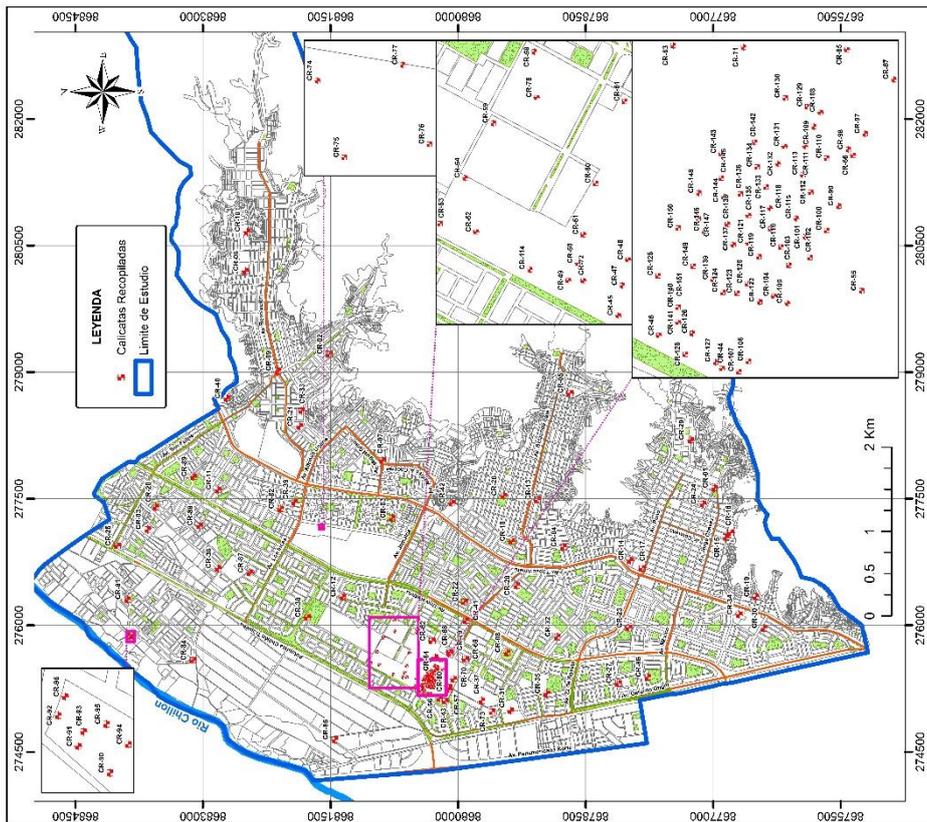


Figura N° 36: Mapa de Ubicación de Calicatas Recopiladas – Elaboración Propia

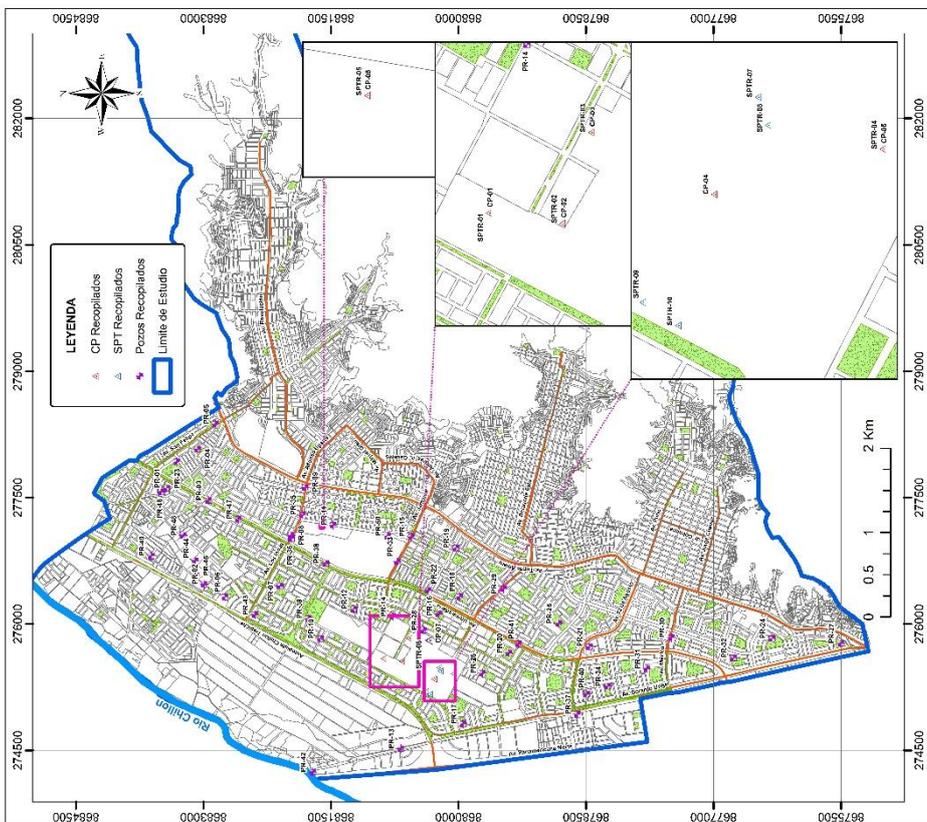


Figura N° 37: Mapa de Ubicación de Ensayo SPT, CP y Pozos Recopilados – Elaboración Propia

Ensayo de Penetración Estándar (SPT) y Auscultación Dinámica con el Cono Peck (CP)

Los ensayos de Penetración Estándar (SPT) y Auscultación Dinámica con el Cono Peck (CP) tienen una profundidad de exploración de 5.90 m y 16.45 m, no se presentó nivel freático en los ensayos.

Perforación de Pozos

La información recopilada fue proporcionada por la identidad de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL) se tienen un rango de profundidad de exploración de 40.00 a 180.00 m, nos permitió tener una observación directa del terreno, se presentó nivel freático en 21 pozos recopilados a 3.00 a 50.00 m de profundidad.

Ensayo de Laboratorio

Los ensayos de laboratorio nos permiten tener propiedades índices del suelo, la Norma E.050 de Suelo y Cimentaciones proporciona normativa para realizar ensayos de laboratorio estándar, especiales y análisis químico;. La normativa nos brinda los requisitos para estudios de suelo con fines de cimentaciones, el cual asegura la estabilidad y permanencia de las edificaciones.

Ensayos Estándar

Los ensayos estándar de mecánica de suelos recopilados para la investigación fueron los siguientes:

Tabla N°15: Lista de Ensayos Estándar Recopilado. Tomado de RNE (2018)

Ensayo Estándar	Reglamento
Contenido de Humedad	NTP 339.127 (ASTM D2216)
Análisis Granulométrico	NTP 339.128 (ASTM D422)
Límite Líquido y Límite Plástico	NTP 339.129 (ASTM D4318)
Peso Específico Relativo de Sólidos	NTP 339.131 (ASTM D854)
Clasificación Unificada de Suelos (SUCS)	NTP 339.134 (ASTM D2487)

Las calicatas recopiladas solo el 69 presentan ensayos estándar cuya tabla resumen se presenta en los anexos. Los ensayos SPT recopilados solo 4 presentan ensayos estándar cuya tabla resumen se presenta en los anexos.

Ensayo Especiales

Los ensayos especiales nos permiten obtener propiedades geotécnicas de caracterización del suelo para cimentaciones e identificación de agentes nocivos por ataque químico al concreto.

Tabla N°16: Lista de Ensayos Especiales Recopilados. Tomado de RNE (2018)

Ensayo Especiales	Reglamento
Consolidación Unidimensional	NTP 339.154 (ASTM D2435)
Corte Directo	NTP 339.171 (ASTM D3080)
Descripción Visual-Manual	NTP 339.150 (ASTM D2488)
Contenido de Sales Solubles Totales en Suelos y Agua Subterránea	NTP 339.152 (BS 1377) ASTM D 1888
Contenido de Cloruros Solubles en Suelos y Agua Subterránea	NTP 339.177 (AASHTO T291) ASTM D 3370
Contenido de Sulfatos Solubles en Suelos y Agua Subterránea	NTP 339.178 (AASHTO T290) ASTM E 275
pH	ASTM D 4792

La cantidad de ensayos especiales recopilados fueron los siguientes: Consolidación Unidimensional (2), Compresión Unidimensional (2), Ensayos de Corte Directo (18) y Ensayos de Elementos Químicos (27). Dichos resultados se encuentran en los anexos.

3.4.2 Ataque Químico por Suelos y Aguas Subterráneas al Concreto de Cimentaciones

Los ensayos químicos del agua o del suelo son fundamentales al momento del análisis de las cimentaciones debido a la acción agresiva que pueden poseer los químicos como: ácidos (pH), los sulfatos presentan los efectos destructivos del concreto, los cloruros causan fenómenos corrosivos en el acero y las sales solubles totales causan la pérdida mecánica de los suelos por el fenómeno de lixiviación. En el caso que se tuviera un pH menor a 4.0 se deberá proponer medidas de protección adecuadas para proteger el concreto, de igual manera si hubiera una alta concentración de elementos químicos nocivos como sulfatos, cloruros y sales solubles totales (SST).

Se concluye en función de los análisis químicos del suelo y agua que las muestras de pH encontradas son mayores 6.5 presentando un medio neutro no agresivo del suelo, los sulfatos indican un leve ataque al concreto de las cimentaciones, además la cantidad de iones cloruros identificados no indican una acción corrosiva en el acero de las cimentaciones, finalmente las sales solubles identificadas no

generaran un ataque de ácido al concreto de cimentación. De acuerdo al inciso señala la ubicación de zonas con presencia de aguas salinas, duras y con pH menor a 7.5. Se realizó un mapa con la ubicación de exploraciones geotécnicas con estudios de elementos químicos y presencia de aguas subterráneas salinas y duras que podrían afectar las cimentaciones.

Tabla N°17: Grado de agresividad de pH. Tomado de Klass y Steinrath (1956)

ph	Medio	Nivel de Agresividad
< 4.0	Extremadamente ácido	
4.0 - 4.5	Muy ácido	
4.5 - 5.0	Ácido	Muy agresivo
5.0 - 6.0	Moderadamente ácido	
6.0 - 6.5	Ligeramente ácido	Agresivo
6.5 - 7.5	Neutro	
7.5 - 8.5	Ligeramente alcalino	No agresivo
> 8.5	Muy alcalino	Condicional

Tabla N°18: Elementos Químicos Nocivos para la Cimentación. Tomado de RNE (2018)

Presencia de suelo en:	Ppm	Grado de Alteración	Observaciones
SULFATOS ⁽¹⁾	0 - 1000 1000 - 2000 2000-20000 > 20000	Leve Moderado Severo Muy severo	Ocasiona un ataque químico al concreto de la cimentación.
CLORUROS ⁽¹⁾	> 6000	Perjudicial	Ocasiona problemas de corrosión de armaduras o elementos metálicos.
SALES SOLUBLES TOTALES ⁽²⁾	> 15000	Perjudicial	Ocasiona problemas de pérdida de resistencia mecánica por problema de lixiviación.

(1) Comité 318-83 ACI.

(2) Experiencia Existente

Tabla N°19: Requisitos para Concreto Expuesto a Soluciones con Sulfatos. Tomado de RNE (2018)

TIPO DE EXPOSICIÓN A LOS SULFATOS	SULFATOS SOLUBLES EN AGUA (SO ₄) PRESENTES EN SUELOS (% EN PESO)	SULFATOS (SO ₄) EN AGUA (ppm)	TIPO DE CEMENTO RECOMENDADO	RELACIÓN AGUA/CEMENTO RECOMENDADO (CONCRETO NORMAL)	f'c MÍNIMO (kg/cm ²)
DESPRECIABLE	0 a 0.10	0 a 150	----	----	----
MODERADA	0.10 a 0.20	150 a 1500	II, IP(MS), IS(MS), I(PM) (MS), I(SM) (MS)	0.5	280
SEVERA	0.20 a 2.00	1,500 a 10,000	V	0.45	315
MUY SEVERA	Sobre 2.00	Sobre 10,000	V + PUZOLANA	0.45	315

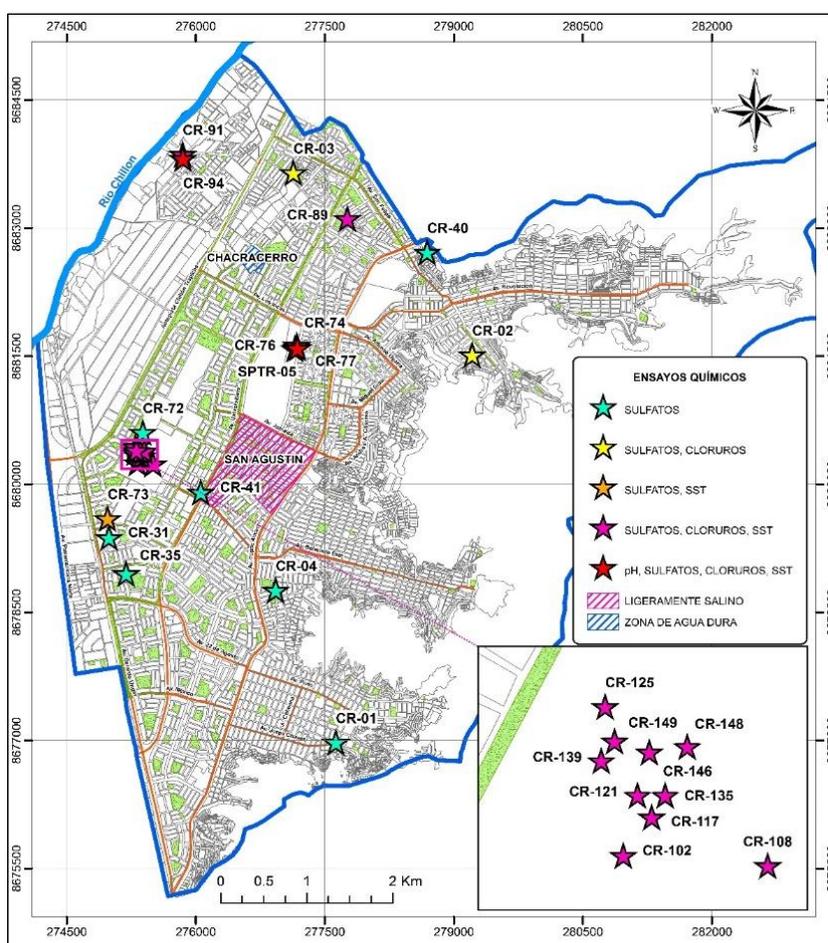


Figura N°38: Mapa de Ubicación ensayos de elementos químicos y presencia de aguas subterráneas salinas y duras – Elaboración Propia.

Debido al actual control del nivel freático realizado por SEDAPAL con la Municipalidad del Distrito de Comas, las aguas subterráneas se presumen que se

encuentra de 5 a 10 m de profundidad. Por lo que el concreto de cimentación de las edificaciones se recomienda que sea Cemento portland Tipo I debido a que no se presentan ninguna restricción por ataques químicos en el área de estudio.

3.4.3 Identificación de Suelos

Para la realización del mapa de identificación de suelos a 1 m y 2.5 m, se necesita haber procesado toda la información recopilada que posea la clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). La caracterización geológica fue considerada para delimitar la sectorización de la zona de estudio.

Mapa de Tipo de Suelos existentes a 1.0 m de profundidad está conformado por gravas un 29.38%, el 49.03% por limos y/o arcillas, 15.51% por arenas, y el 1.07% por relleno antrópico no controlado.

Mapa de Tipo de Suelos existentes a 2.5 m de profundidad está conformado por gravas un 48.92%, el 29.97% por limos y/o arcillas, 15.59% por arenas, y el 0.51% por relleno antrópico no controlado. A continuación, se detallan las características de cada uno de estos tipos de suelos y los criterios seguidos para su subdivisión.

Formaciones Rocosas

Las unidades estratigráficas identificadas en el Sector Este del distrito están conformado por las formaciones de Quilmana, Atocongo, Pamplona, Herradura y Marcavilca. Las calicatas que presentan fragmentos de rocas están ubicadas en partes altas de la frontera de la zona urbana, de las cuales podemos mencionar CR-02, CR-10, CR-18 y CR-24. Solo la calicata CR-16 se identificó la presencia de roca ígnea intrusiva a 1.0m de profundidad. La topografía abrupta del sector nos permite predecir presencia de formaciones rocosas que subyacen la grava y arenas.

Gravas

Se identifica la presencia de depósitos fluviales, aluviales y coluviales, las gravas presentan bordes angulares, sub-redondeados y redondeados. La compacidad es de media a muy densa, bajo contenido de humedad. En cuanto a su clasificación predominan las gravas mal gradadas (GP).

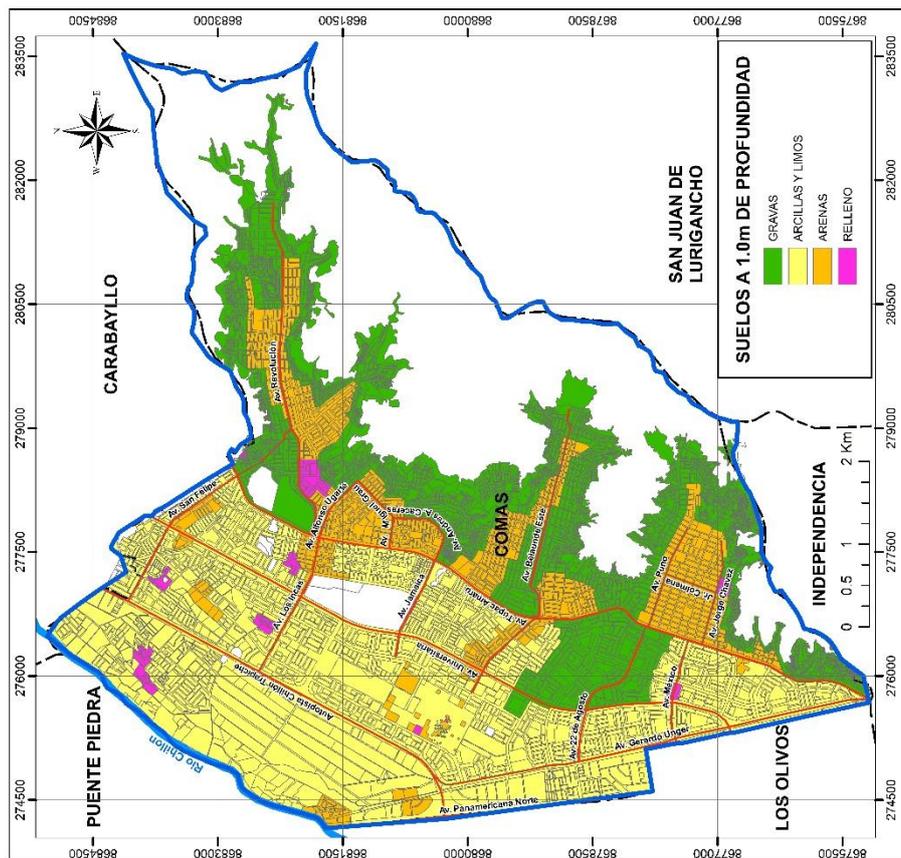


Figura N° 39: Mapa de Tipo de Suelo a 1.00m de profundidad – Elaboración Propia.

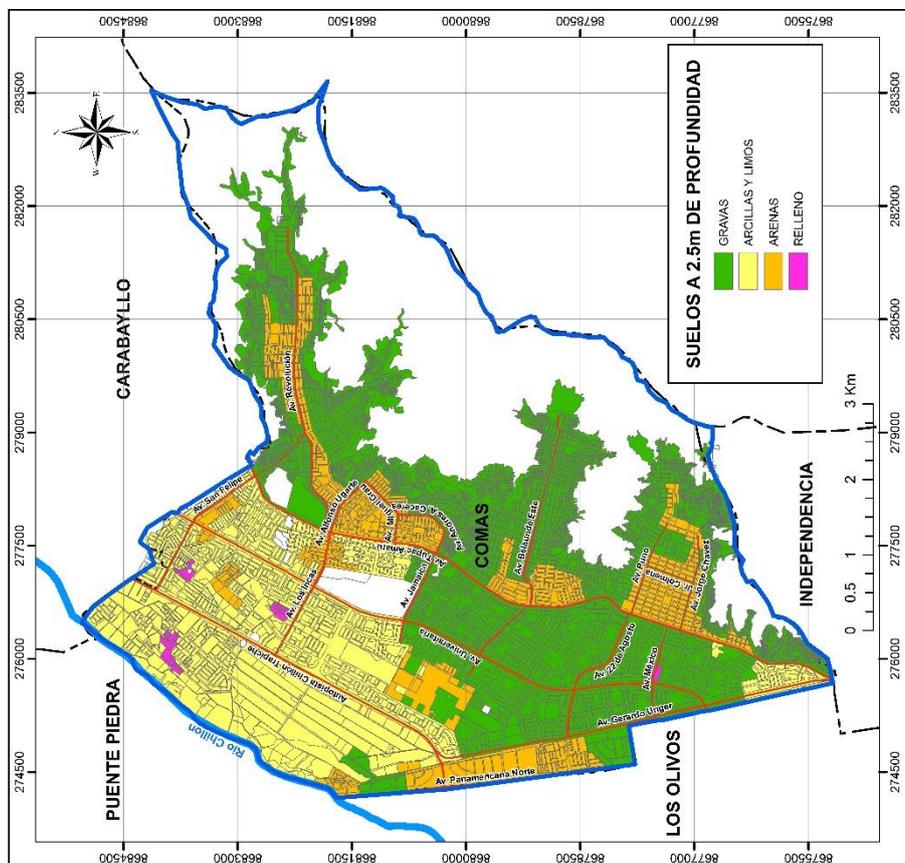


Figura N° 40: Mapa de Tipo de Suelo a 2.50m de profundidad – Elaboración Propia.

Arenas

Predomina los materiales pertenecientes a depósitos fluviales y aluviales, en muchos casos subyacen a materiales gravosos con intercalaciones de arenas, arcillas y limos. En cuanto a su clasificación predominan las arenas limosas (SM).

Arcillas y Limos

Las arcillas y limos están conformado por partículas con un tamaño máximo de 0.075 mm, aunque sus propiedades mecánicas e hidráulicas no se encuentran dominados por su granulometría, sino, por su estructuración y su historia geológica (Badillo & Rodríguez, 1990). Predomina los materiales pertenecientes a depósitos fluviales y aluviales, en muchos casos subyacen a materiales gravosos con intercalaciones de arenas y limos. En cuanto a su clasificación predominan las arcillas baja plasticidad (CL) y limo baja plasticidad (ML).

Relleno

Se identificaron áreas de rellenos antrópicos en zonas urbanas, con ayuda de las siguientes exploraciones geotécnicas CR-87, CR-03, CR-81, CR-94, CR-91, CR-93, CR-96, CR-95 y PR-30.

3.4.4 Análisis de Capacidad de Carga del Suelo

Una vez identificado los tipos de suelo en la zona de estudio, se procede a hacer el análisis de capacidad de carga de suelo. Los parámetros empleados para evaluar los sectores fueron estimados en base a los ensayos recopilados. Para los análisis se utilizó la formulación modificada de Terzaghi y Terzaghi (utilizado en la Norma E 0.50 Suelos y Cimentaciones). Los parámetros empleados en el análisis son los siguientes:

Tabla N°20: Parámetros considerados para el análisis de Capacidad de Carga del Suelo –
Elaboración Propia.

DATOS INGRESADOS	ZONA I	ZONA II	ZONA III
Ángulo de fricción interna: ϕ (°)	30	25	23
Cohesión: c (Kg/cm ²)	0.0	0.0	0.25
Densidad del suelo por encima del N.C. (kg/m ³)	1900	1800	1700
Profundidad de Nivel Freático (m)	N.P.	N.P.	N.P.
Poisson (u)	0.3	0.3	0.3
Módulo de Elasticidad: Es(ton/m ²)	7000	3500	2700

Para los suelos granulares no se consideró la cohesión, a diferencia de un suelo con mayor proporción de materiales finos como la Zona III. Se realizó una comparación de los resultados obtenidos considerando factor de seguridad $FS=3.0$, se considera la falla general por corte y la falla local.

Tabla N°21: Carga admisible de carga utilizando metodología de Terzaghi, y Terzaghi Modificado para Falla General y Local – Elaboración Propia.

TIPO DE FALLA	ZONA	Prof. Df(m)	Ancho B(m)	$Q_{adm\ ult}$ TERZAGHI E.050 (kg/cm ²)	$Q_{adm\ ult}$ TERZAGHI MODIFICADO (kg/cm ²)	Q_{adm} (kg/cm ²) CISMID
FALLA GENERAL	ZONA I	0.80	0.60	1.50	1.52	1.73
		1.20	0.60	2.07	2.29	2.46
		1.50	0.60	2.50	2.94	3.01
	ZONA II	1.00	0.60	0.91	0.96	1.20
		1.20	0.60	1.07	1.17	1.43
		1.50	0.60	1.29	1.51	1.79
	ZONA III	2.00	0.60	1.19	1.52	1.00
		2.20	0.60	1.30	1.72	1.16
		2.50	0.60	1.48	2.05	1.31
FALLA LOCAL	ZONA I	0.80	0.60	0.50	0.51	-
		1.20	0.60	0.71	0.78	-
		1.50	0.60	0.87	1.01	-
	ZONA II	1.00	0.60	0.38	0.40	-
		1.20	0.60	0.44	0.49	-
		1.50	0.60	0.54	0.63	-
	ZONA III	2.00	0.60	0.56	0.71	-
		2.20	0.60	0.61	0.80	-
		2.50	0.60	0.70	0.95	-

De los resultados obtenidos para cada metodología se puede concluir que la carga admisible ultima de la metodología de Terzaghi brinda resultados más conservadores, además se comprueba la semejanza con los resultados obtenidos por el CISMID (2011).

Para los análisis de Asentamientos se consideró los valores de Modulo de Elasticidad y Poisson, se analizó un cimiento corrido considerando la cimentación rígida y flexible tal como se indica a continuación:

Tabla N°22: Asentamiento Elástico para cimientos corridos – Elaboración Propia.

TIPO DE FALLA	ZONA	Prof. Df(m)	Ancho B(m)	$Q_{adm\ ult}$ (kg/cm ²)	S (cm) Rígida	S (cm) Flexible Centro	S (cm) Flexible Esquina	S (cm) Flexible Medio
FALLA GENERAL	ZONA I	0.80	0.60	1.50	0.25	0.30	0.15	0.26
		1.20	0.60	2.07	0.34	0.41	0.21	0.36
		1.50	0.60	2.50	0.41	0.49	0.25	0.44
	ZONA II	1.00	0.60	0.91	0.30	0.36	0.18	0.32
		1.20	0.60	1.07	0.35	0.42	0.21	0.37
		1.50	0.60	1.29	0.42	0.51	0.26	0.45
	ZONA III	2.00	0.60	1.19	0.50	0.61	0.30	0.54
		2.20	0.60	1.30	0.55	0.67	0.33	0.59
		2.50	0.60	1.48	0.63	0.76	0.38	0.67

Los asentamientos que se producirán de acuerdo a los cálculos son menores de 2.54cm (1"). Por lo cual, no se tendrían problemas de asentamientos en las zonas analizadas.

Cabe resaltar que los resultados proporcionados son valores referenciales, se recomienda realizar estudios geotécnicos de acuerdo a la edificación de fundación, asentar edificaciones en material de relleno no está permitido de acuerdo a nuestra normativa.

3.5 MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Estudios previos, como el realizado por el CISMID (2011) elaboraron microzonificación geotécnica con la información disponible de la época. En la actualidad en Comas debido a la necesidad inmobiliaria y el creciente apogeo económico provocó nuevas edificaciones de concurrencia masiva de personas, teniendo como resultado mayor cantidad de estudios de mecánica de suelos.

Con la información recopilada hasta la fecha, se logró obtener los mapas de Tipo de Suelo a 1.00 y 2.50 m de profundidad, respectivamente. En función a su clasificación de suelos y a través de cálculos matemáticos se obtuvo las capacidades portantes y asentamientos inmediatos para cimientos corridos de 0.60 m de ancho para diversas profundidades, dichos cálculos geotécnicos nos brindaran información para la sectorización de la zona de estudio.

3.5.1 Zona I

Comprendido por gravas de consistencia media a muy densa del cual subyace material rocoso a grandes profundidades. Se encuentra la presencia de gravas redondeadas, sub-redondeados y angulares. La bolonería, cantos rodados y cascajos están presentes en la zona de planicie del subsuelo del distrito de manera estratificada. El material gravoso es el más abundante en el distrito, luego esta los depósitos de arenas de compactación medianamente densa a densa en la parte central del distrito.

De acuerdo con las características geotécnicas, la zona descrita anteriormente presenta las mejores condiciones para la cimentación de edificaciones convencionales. El cimiento corrido con una profundidad de cimentación de 0.80 a 1.50 m, la zona posee una capacidad de carga admisible de 1.50 a 2.50 kg/cm².

3.5.2 Zona II

Comprendido por arenas de consistencia media a densa y material fino como arcillas y/o limos de compactación medianamente densa a muy densa. Los depósitos de suelos cuentan con mayor proporción el material granular que el fino, no es susceptible a asentamientos por aumento del nivel freático. El cimiento corrido con una profundidad de cimentación de 1.00 a 1.50 m, la zona posee una capacidad de carga admisible de 0.91 a 1.29 kg/cm².

3.5.3 Zona III

Comprendido de manera predominante de material fino como arcillas y/o limos de compactación media, que ante el aumento del nivel freático es susceptible a asentamientos que afecta la infraestructura existente. El cimiento corrido con una profundidad de cimentación de 2.00 a 2.50 m, la zona posee una capacidad de carga admisible de 1.20 a 1.48 kg/cm².

3.5.4 Zona IV

Comprendido por zonas abruptas de fuerte pendiente, susceptible a deslizamientos y caídas de rocas, debido a la habilitación negligente para ocupación urbana.

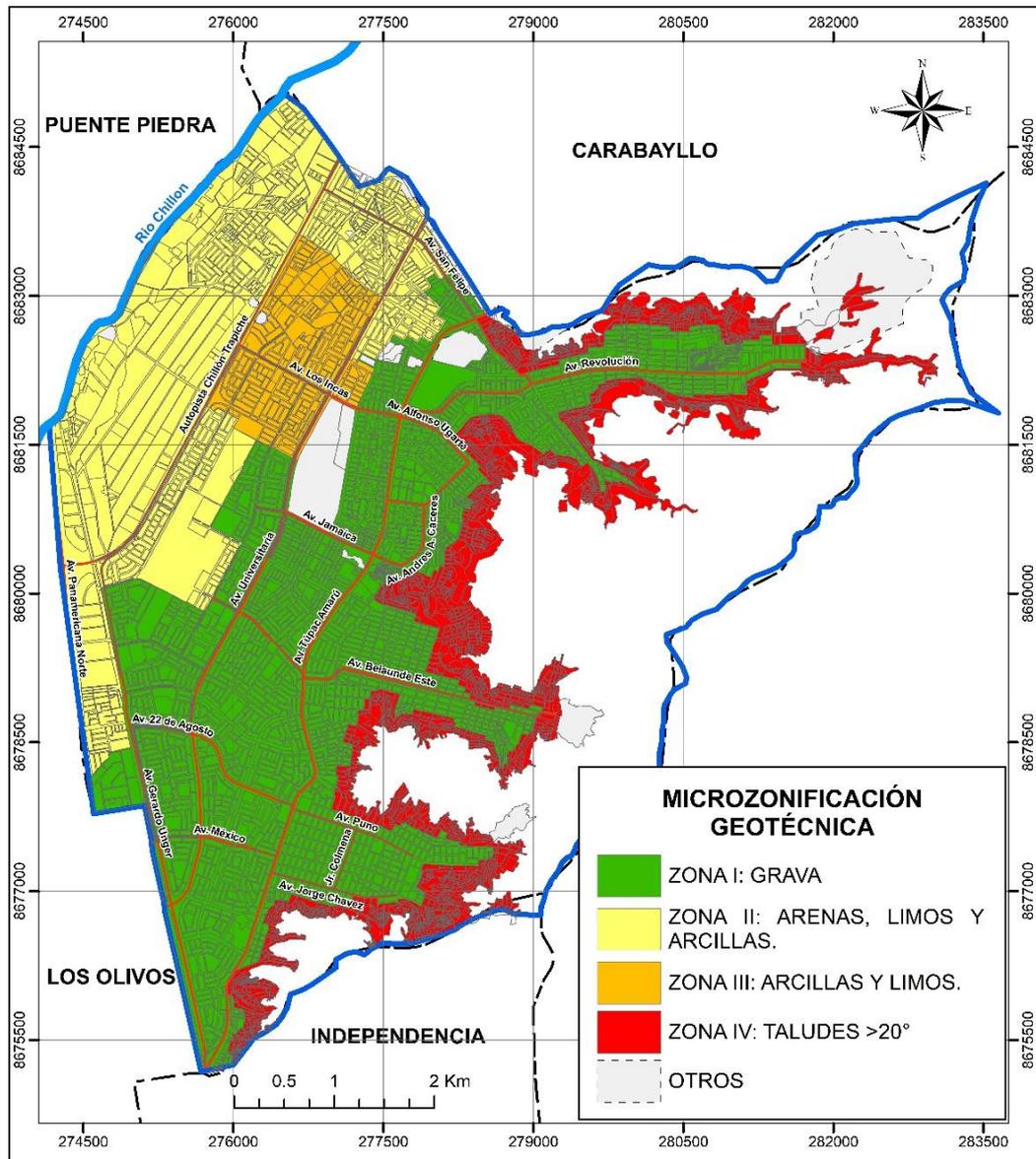


Figura N° 41: Mapa de Microzonificación Geotécnica del Distrito de Comas – Elaboración Propia.

CAPÍTULO IV: CARACTERIZACIÓN DINÁMICA

4.1 INTRODUCCIÓN.

La caracterización dinámica del suelo es fundamental en los estudios de microzonificación sísmica para la identificación de las propiedades dinámicas, aplicando distintos métodos geofísicos que nos permita reunir información valiosa. Los ensayos empleados para esta sección fueron la medición de microtemores, y la obtención de perfiles de velocidades de ondas longitudinales y transversales.

La medición puntual de microtemores determina el periodo fundamental del suelo, que por sus cualidades es económica y viable. Los ensayos de MASW, Arreglo de Microtemores y Refracción Sísmica, permite obtener los perfiles de velocidades de ondas de corte y longitudinales, respectivamente. Finalmente, de toda la información recopilada y ejecutada, se logró proporcionar mapas temáticos como de Isoperiodos y Vs30, los cuales poseen rangos estandarizados de acuerdo a la Norma Técnica E.030 para su clasificación de sectores.

4.2 INFORMACIÓN RECOPIADA

La información recopilada fue obtenida de las siguientes entidades pública y privada: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID-FIC-UNI), Jorge Alva Hurtado y ZER Geosystem Perú S.A.C; además se obtuvo perfiles de velocidad de onda de corte de la tesis de Miguel Quispe (2012). En su conjunto, se logró recopilar 86 mediciones puntuales de microtemores, 50 perfiles de velocidad de onda de corte y 13 perfiles de velocidad de onda longitudinales. Lo comprenden los siguientes ensayos MASW (46), Refracción Sísmica (13), medición puntual de microtemores (86) y arreglo de microtemores (04). Todas las exploraciones geofísicas recopiladas fueron georreferenciadas en el sistema de proyección de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), para un mejor análisis espacial.

Los perfiles de velocidad de ondas de corte mostrados a continuación se separaron de acuerdo a la procedencia del proyecto. Las líneas sísmicas MASWR-01 al MASWR-07 no se pudieron obtener el valor del Vs30, debido a que solo se obtuvo 20 metros de exploración cuyo rango de velocidades varía entre 160 m/s a 540 m/s.

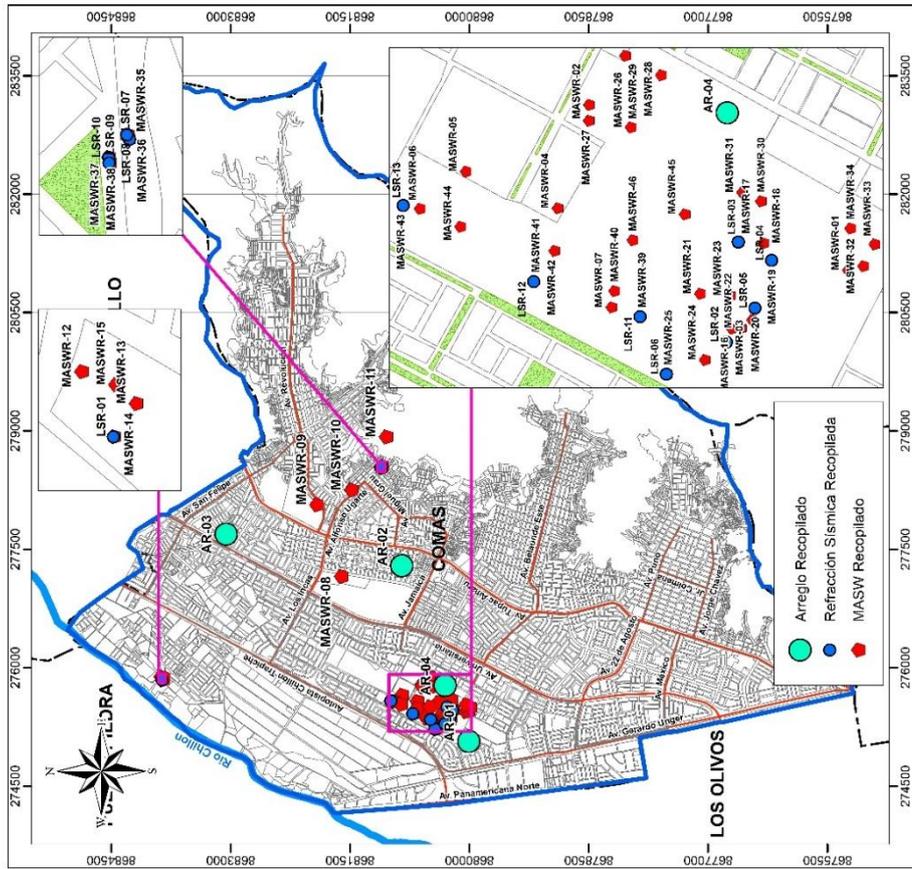


Figura N° 42: Mapa de Ubicación de Ensayos Geofísicos Recopilados-MASW, Refracción Sísmica y Arreglo de Microtremores – Elaboración Propia.

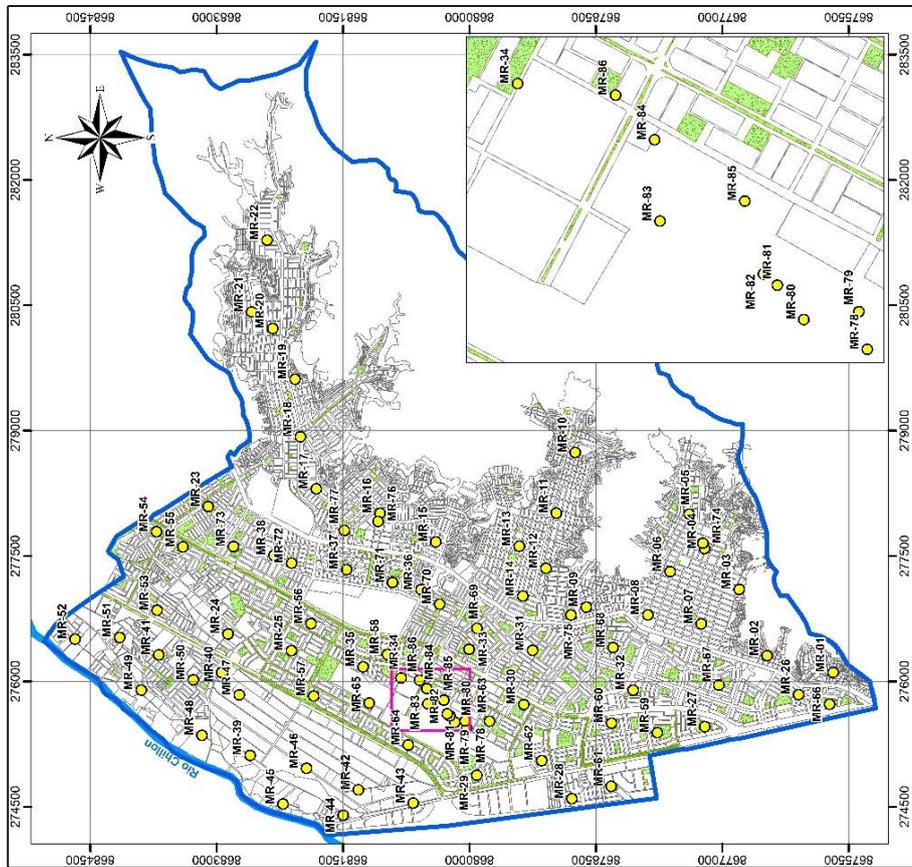


Figura N° 43: Mapa de Ubicación de Ensayos Geofísicos Recopilados-Medición Puntual de Microtremores. – Elaboración Propia.

Las líneas MASWR-08 al MASWR-11 los valores de V_{s30} varían entre 338 a 767 m/s, característico de un suelo medianamente denso a muy denso con rango de velocidades de 158 a 1150 m/s. Las líneas MASWR-12 al MASWR-15 los valores de V_{s30} varían entre 383 a 402 m/s, característico de un suelo medianamente denso a denso con rango de velocidades de 160 a 614 m/s.

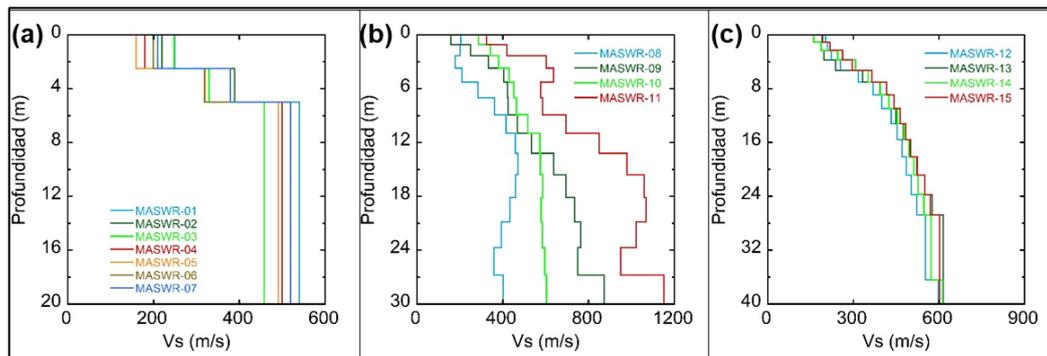


Figura N° 44: Perfiles de Velocidad de Onda de Corte Recopilados (a) MASWR-01 al MASWR-7 (b) MASWR-08 al MASWR-11 (c) MASWR-12 al MASWR-15 – Elaboración Propia.

Las líneas MASWR-16 al MASWR-25 los valores de V_{s30} varían entre 449 a 516 m/s, característico de un suelo medianamente denso a denso con rango de velocidades de 202 a 702 m/s. Las líneas MASWR-26 al MASWR-35 los valores de V_{s30} varían entre 356 a 475 m/s, característico de un suelo medianamente denso a denso con rango de velocidades de 180 a 582 m/s. Las líneas sísmicas MASWR-35 al MASWR-38 no se pudieron obtener el valor del V_{s30} , debido a que solo se obtuvo 8 metros de exploración cuyo rango de velocidades varía entre 220 m/s a 709 m/s.

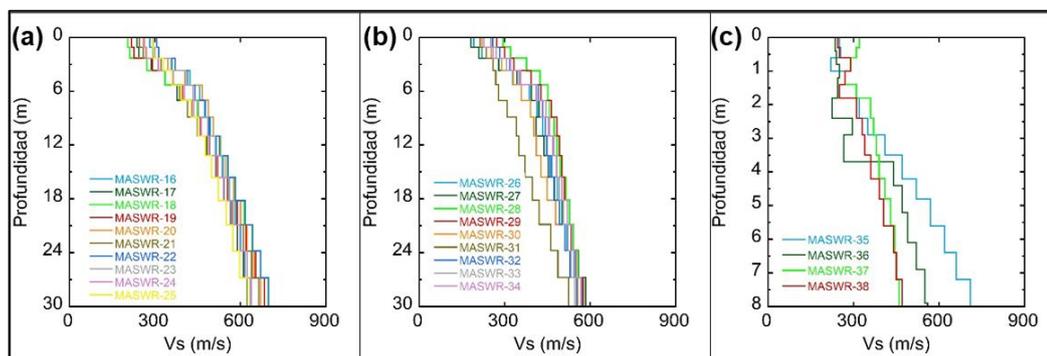


Figura N° 45: Perfiles de Velocidad de Onda de Corte Recopilados (a) MASWR-16 al MASWR-25 (b) MASWR-26 al MASWR-34 (c) MASWR-35 al MASWR-38 – Elaboración Propia.

Las líneas MASWR-39 al MASWR-46 los valores de V_{s30} varían entre 405 a 525 m/s, característico de un suelo medianamente denso a denso con rango de

velocidades de 186 a 602 m/s. Los Arreglos de Microtremores permiten obtener perfiles de velocidades de onda de corte más profundo, AR-01 cuenta con 70 m de profundidad de exploración con rango de velocidades de 240 a 880 m/s, AR-02 cuenta con 30 m de profundidad de exploración con rango de velocidades de 200 a 550 m/s, AR-03 cuenta con 15 m de profundidad de exploración con rango de velocidades de 220 a 680 m/s y AR-04 cuenta con 75 m de profundidad de exploración con rango de velocidades de 200 a 1300 m/s.

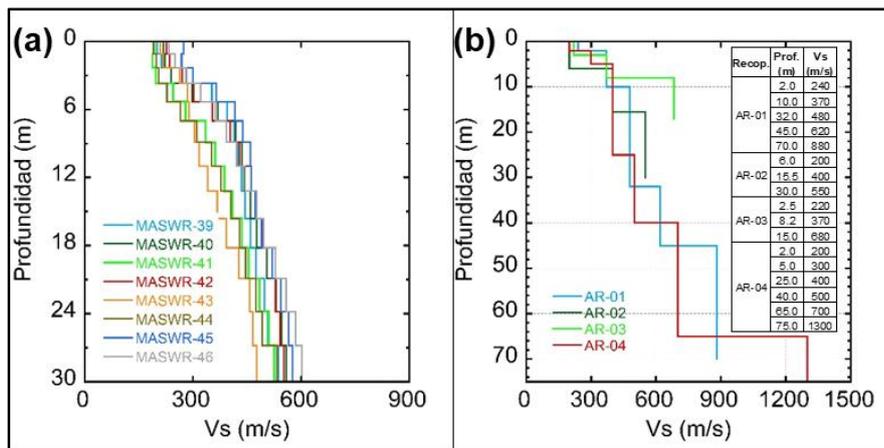


Figura N° 46: Perfiles de Velocidad de Onda de Corte Recopilados (a) MASWR-39 al MASWR-46 (b) AR-01 al AR-03 – Elaboración Propia.

Se realizó la reprocesamiento de los registros de microtremores disponible, pudiéndose identificar la presencia de coeficientes espectrales H/V con picos claros, múltiples picos, picos agudos y picos planos como se puede apreciar a continuación:

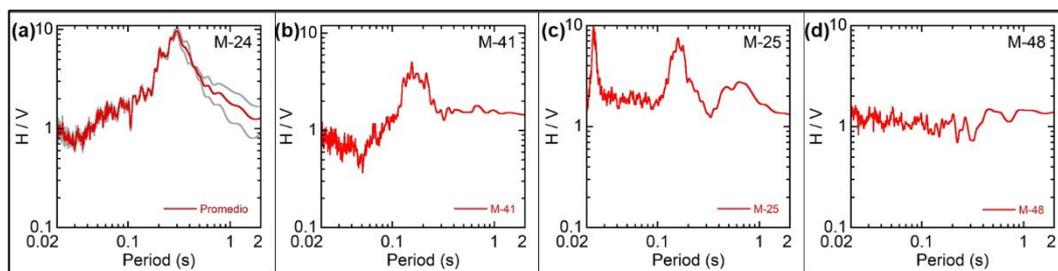


Figura N° 47: Espectro H/V (a) claro, (b) múltiples o ancho (c) agudos y (d) planos – Elaboración Propia.

Los valores de periodo fundamental obtenidos de los microtremores recopilados en el distrito de Comas se encuentran presente en los anexos.

4.3 ENSAYOS EJECUTADOS

4.3.1 Medición Puntual de Microtremores

Equipo Utilizado

Para el ensayo de medición de puntos de microtremores se utilizaron los siguientes equipos brindados por el CISMID- FIC- UNI:

Tabla N°23: Equipo Empleado para la Medición Puntual de Microtremores - CISMID

Equipo GEODAS	Equipo TOKYO
02 velocímetros (sensor de velocidad) de bobina movable CR 4.5-1S, cuyo periodo natural es de un segundo.	02 sensores Network Tokyo Sokushin CV-374AV2
01 sistema de Adquisición de Datos GEODAS 15-HS	02 antenas GPS UBLOX
01 computadora portátil NEC, modelo VersaPro VS-8.	02 laptops TOSHIBA
01 GPS GARMIN modelo GPS16x-LVS.	2 baterías
Cables de 50 m de longitud.	02 cables de red TSUKO
01 cable de conexión para batería.	02 cables a tierra tipo cocodrilo



Figura N° 48: (a) Equipo de Medición de microtremores (b) Realización del Ensayo de Medición Puntual de Microtremores – Elaboración Propia.

Pruebas de Campo

Las mediciones de microtremores fueron realizadas en la superficie del terreno para un tiempo de registro de 20 min, frecuencia de muestreo de 200Hz. Los velocímetros realizan el registro de las tres direcciones (X, Y, Z) del suelo. En campo se evitó el tendido de cableado externo largo que pueda causar interferencia mecánica y electrónica, presencia de lluvia o vientos muy fuertes (generan distorsiones grandes e inestables a bajas frecuencias), presencia de

movimiento de vehiculares. Los sensores empleados se orientaron con ayuda de la brújula (norte-sur y este-oeste) y se nivelaron verticalmente.

Resultados de las Mediciones

El análisis empleado para las mediciones de microtemores puntuales fue el método del cociente espectral H/V (Nakamura, 1989) que emplea los Espectros de Fourier, los registros tomados son de las velocidades de los microtemores. Se ejecutaron en total 55 mediciones en el distrito distribuidos de manera uniforme, los espectros H/V fueron adjuntados en los anexos. Se logró identificar que el periodo fundamental en el distrito tiene como valor máximo de 0.65 s y mínimo de 0.05 s.

4.3.2 Ensayo MASW

El ensayo MASW (Análisis de Ondas Superficiales en Arreglo Multicanal) posee buena confiabilidad y permite obtener el parámetro normalizado de Vs30.

Equipo Utilizado

Para el ensayo MASW se utilizó el equipo McSeis-SW 24 desarrollado por la empresa OYO CORPORATION, el cual fue brindado por el CISMID- FIC- UNI con las siguientes características:

Tabla N°24: Equipo Empleado para el Ensayo MASW y Refracción Sísmica – CISMID

Equipo McSeis-SW 24	
24 geófonos de 4.5Hz de frecuencia	Platinas de aluminio para ejecutar ensayos en superficies pavimentadas o sobre losas de concreto.
Sismógrafo McSeis-SW	
Martillo de 10kg	
Computadora portátil	
Cables de conexión de geófonos	

Pruebas de Campo

El ensayo es ejecutado mediante la adquisición de información de las matrices lineales de geófonos. La longitud de onda más corta que se puede registrar está en función a la separación entre geófonos, de esta manera se determina los estratos superficiales. La profundidad máxima de exploración está determinada por la longitud de onda más larga de las ondas superficiales, que depende de la longitud total del ensayo y la energía aplicada de la fuente activa. Para no afectar el registro con ondas superficiales se debe realizar un golpe seco en el plato

metálico. En función a la frecuencia de muestreo y tiempo de registro, se podrá analizar hasta rocas fracturadas o depósitos de gravas (Lin et al., 2017).



Figura N° 49: (a) Equipo de Ensayo MASW (b) Ejecución del Ensayo de Refracción Sísmica – Elaboración Propia.

Resultados de las Mediciones

El análisis empleado es la delimitación de la curva de dispersión, para luego emplear una inversión iterativa. Las líneas sísmicas ejecutadas tenían una longitud de 66m, frecuencia de muestreo de 500 Hz y con 4 shots de registro.

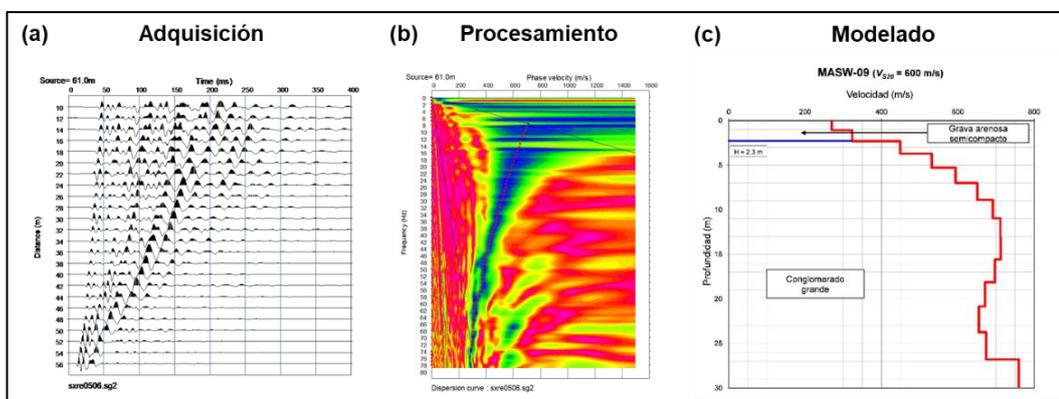


Figura N° 50: Análisis ejecutado en mediciones de Ensayo MASW – Elaboración Propia.

Se ejecutaron 12 mediciones del ensayo MASW, pero se eliminó el MASW-05 debido al ruido identificado en el registro, al final solo se consideraron 11 mediciones, las curvas de dispersión delimitadas y los perfiles de velocidad de onda de corte obtenidos de cada medición fueron adjuntados en los anexos. Se logró identificar que el V_{s30} en el distrito tiene como valor máximo de 600 m/s y mínimo de 333m/s.

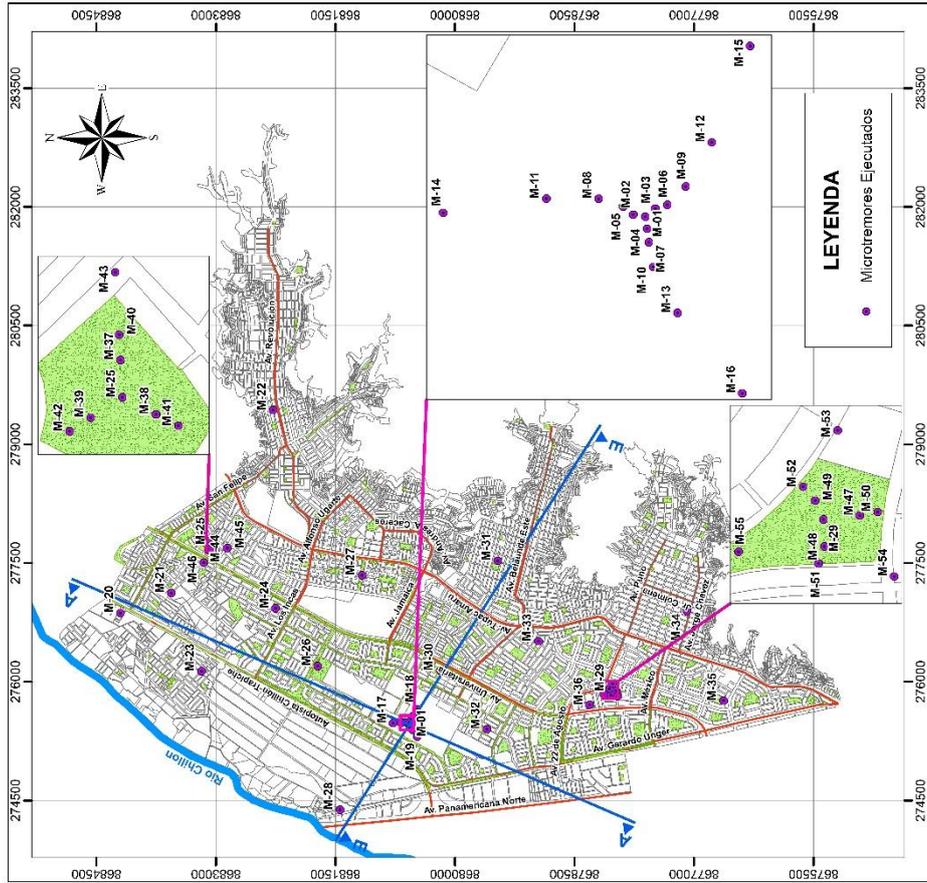


Figura N° 51: Mapa de Ubicación de Ensayos Geofísicos Ejecutados-Medición Puntual de Microtremores – Elaboración Propia.

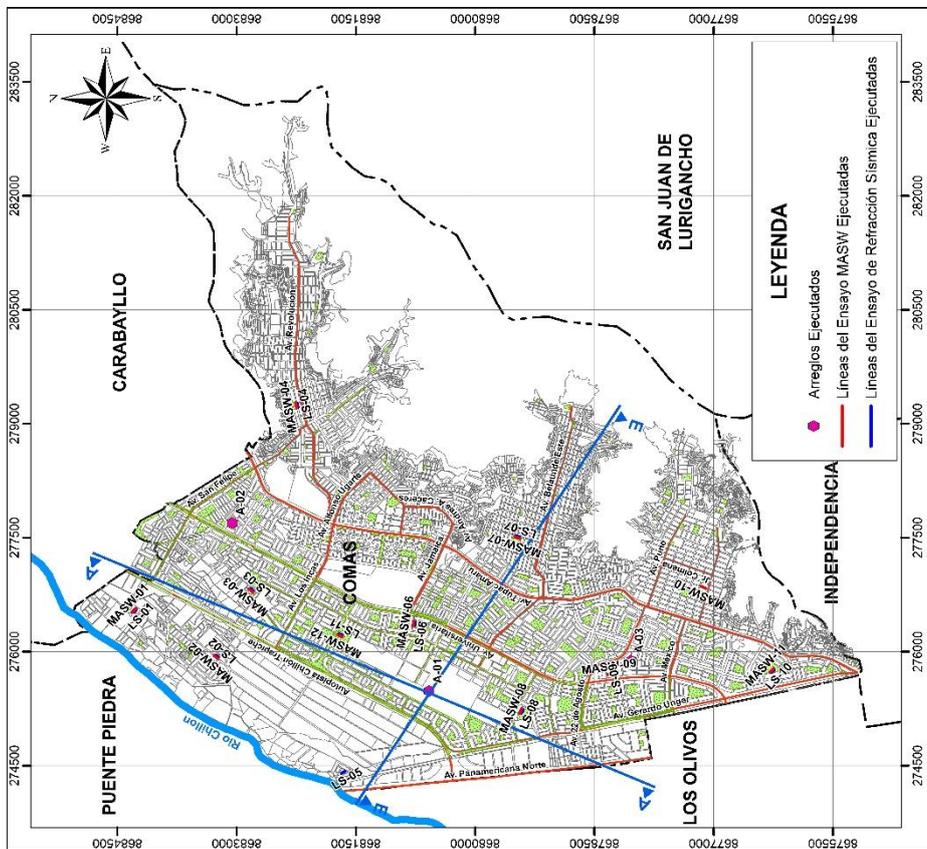


Figura N° 52: Mapa de Ubicación de Ensayos Geofísicos Ejecutados-Ensayo MASW, Refracción Sísmica y Arreglo de Microtremores – Elaboración Propia.

4.3.3 Ensayo Refracción Sísmica

Equipo Utilizado

Para el ensayo Refracción Sísmica se empleó el equipo del ensayo de MASW.

Pruebas de Campo

El ensayo es ejecutado mediante la adquisición de información de las matrices lineales de geófonos. Cada geófono instalado registrará el arribo de las ondas a lo largo perfil del suelo, dependiendo de la longitud se obtendrá la profundidad de exploración. La cantidad de shots ejecutados dependerán de la longitud de la línea sísmica, mínimo se deben realizar 3 shots.

Resultados de las Mediciones

El análisis empleado para la medición de Ensayos Refracción Sísmica es a través de las curvas dromocrónicas que representan el tiempo de llegada para cada geófono, se obtuvieron mejores resultados en lugares donde no había ruidos considerables. Las líneas sísmicas tenían una longitud de 48m, frecuencia de muestreo de 250 Hz y con 3 shots de registro.

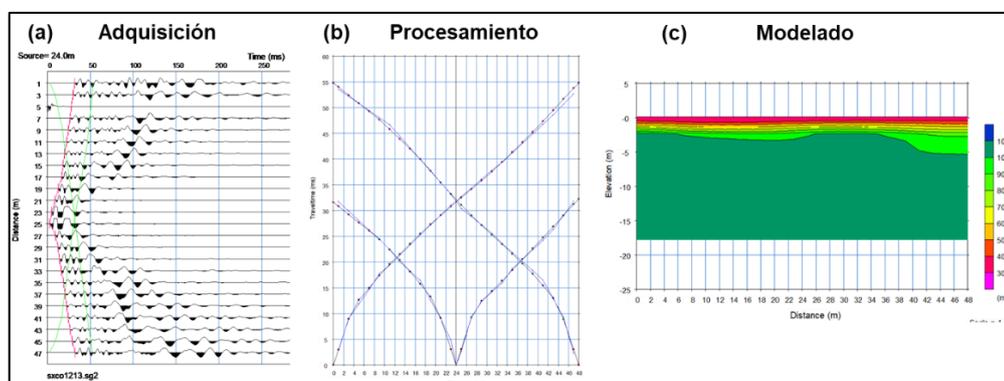


Figura N° 53: Análisis ejecutado en mediciones de Ensayo Refracción Sísmica – Elaboración Propia.

Se ejecutaron 11 mediciones del ensayo Refracción Sísmica en el distrito los cuales fueron distribuidos de manera uniforme, la curva dromocrónica delimitada y los perfiles bidimensionales de velocidad de onda de longitudinal obtenidos de cada medición fueron adjuntados en los anexos. Se logró identificar que en 6 mediciones se presume la presencia de nivel freático variable en la zona de estudio.

4.3.4 Ensayo Arreglo de Microtremores

Equipo Utilizado

Para el ensayo de Arreglo de Microtremores se utilizaron los equipos empleados para la Medición Puntual de Microtremores, pero en mayor cantidad.

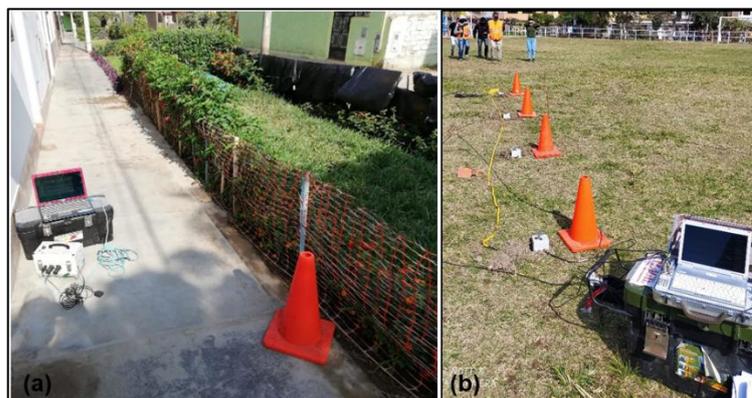


Figura N° 54: Equipo empleado para la Ejecución de Arreglo de Microtremores (a) TOKYO GEODAS – CISMID. (b) TOKYO GEODAS – CISMID.

Pruebas de Campo

Para la Ejecución del Arreglo de Microtremores primero se debe definir un lugar amplio donde realizar el ensayo, que se encuentre alejado de ruidos externos como avenidas principales y lugares de aglomeración de personas. Luego se procede a establecer los radios de exploración que se realizarán de acuerdo al espacio disponible. El número de sensores a emplear dependerá de las metodologías de análisis, se recomienda como mínimo 4 sensores. Los sensores del arreglo circular serán los vértices de una figura geométrica regular inscrito en una circunferencia empleando una fuente pasiva y el arreglo lineal los sensores irán alineados con una fuente activa.

Resultados de las Mediciones

El análisis empleado para la medición de Arreglo de Microtremores es el análisis espectral, consiste en determinar la curva de dispersión del perfil del suelo de los arreglos circulares y lineales ejecutados, luego se realiza el proceso de inversión para obtener un perfil de velocidades de ondas de corte con mayor profundidad de exploración (Arai & Tokimatsu, 2005). Se generó una población inicial de 20 y se aplicaron operaciones genéticas para generar una nueva población con el mismo tamaño. Las iteraciones finalizaron en la generación 20. Además de la

operación de cruce y mutación, se utilizaron 20 operaciones genéticas más para hacer que la inversión converja hacia la solución óptima global. Dado que esta inversión es un tipo de enfoque probabilístico que utiliza números aleatorios y encuentra modelos cercanos a una solución óptima global, se repite varias veces variando el número aleatorio inicial.

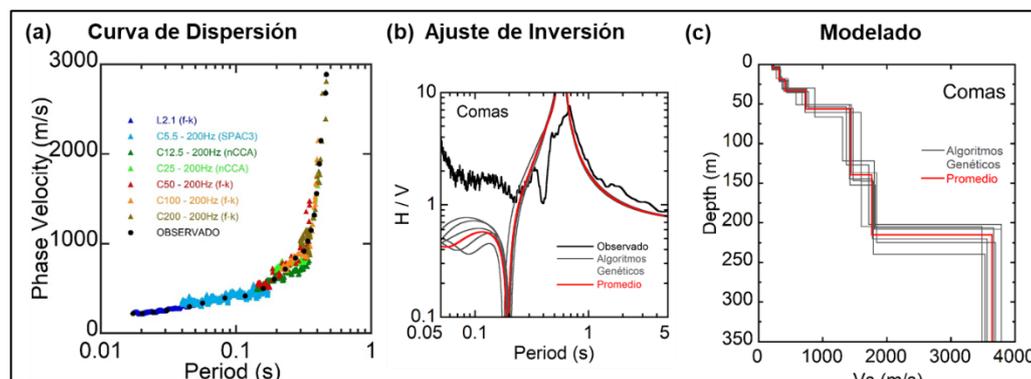


Figura N° 55: Análisis ejecutado en mediciones de Ensayo de Arreglo de Microtremores –
Elaboración Propia.

Se realizaron 3 mediciones de Arreglos de Microtremores se ejecutaron arreglos lineales de hasta 2 m de separación y arreglos circulares de hasta 200 m de radio de circunferencia. Los perfiles de velocidades de ondas de corte obtenidos tuvieron una profundidad de exploración máxima de 350 m. Las curvas de dispersión, perfiles de velocidades de ondas de corte y verificación del ajuste empleado se encuentra adjuntados en los anexos.

4.4 DETERMINACIÓN DEL PERIODO DE VIBRACIÓN DEL SUELO.

Se lograron identificar en los espectros H/V el periodo predominante del suelo (presenta mayor amplificación), pero también sectores que los espectros H/V permitían ver dos picos que se desarrollaban. Esto indica cambios abruptos en el espesor del suelo, el periodo fundamental del suelo puede aumentar o viceversa dependiendo de la profundidad del depósito analizado. Se observa la presencia de periodos predominantes de 0.1 a 0.67 segundos en la zona de estudio. Estos resultados nos permiten concluir la presencia de depósitos de suelos flexibles (periodo predominante mayor a 0.4 segundos) en la zona sur de la planicie del distrito y sector alrededor a la ribera del río. Los depósitos de suelos rígidos están presentes en la ladera de los cerros con periodos predominantes menores e iguales a 0.2 segundos.

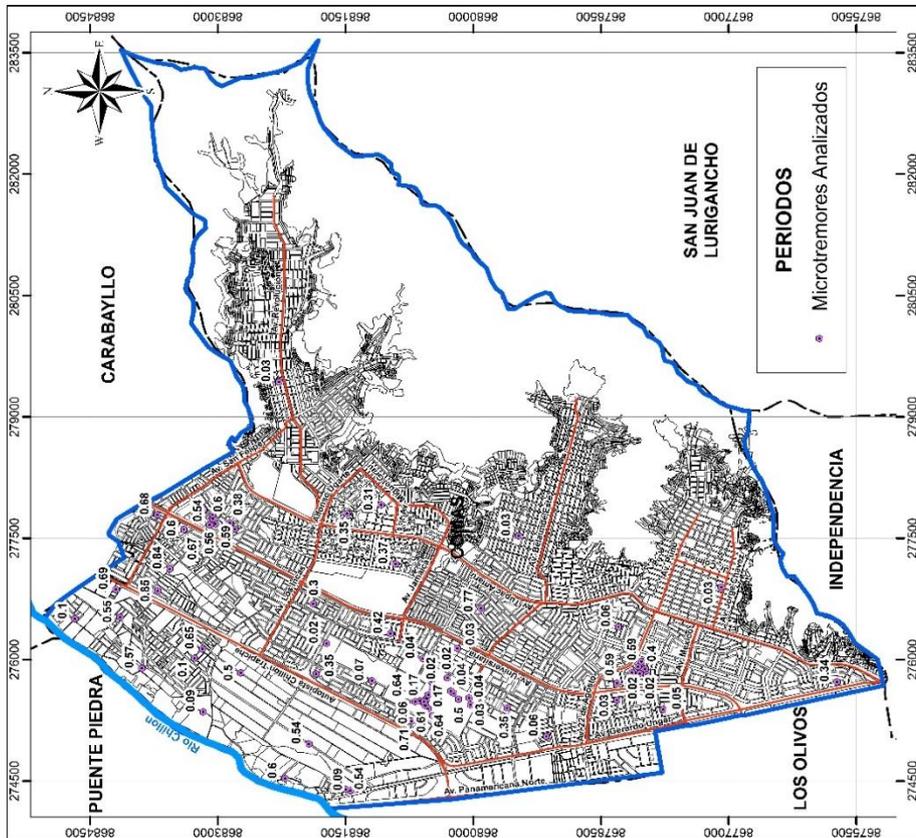
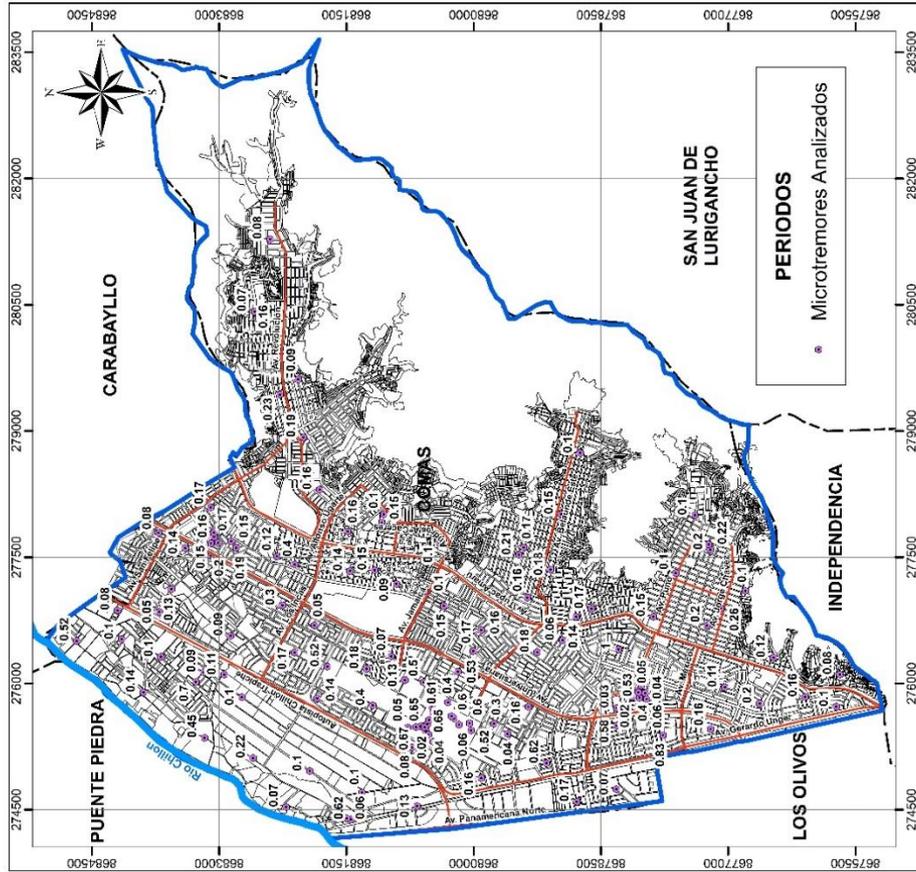


Figura N° 56: Mapa que muestra los periodos fundamentales obtenido de las curvas H/V de los microtremores recopilados y ejecutados – Elaboración Propia.

Figura N° 57: Mapa que muestra los periodos identificados en segundo pico de amplificación de los microtremores recopilados y ejecutados – Elaboración

4.5 DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDADES DE ONDAS DE CORTE

Los ensayos ejecutados de MASW y Arreglo de Microtremores permitieron generar 14 perfiles de velocidades de ondas de corte. Se caracterizaron los estratos del perfil del suelo en base a exploraciones geotécnicas recopiladas cerca de los ensayos geofísicos ejecutados, para tener una adecuada descripción.

4.5.1 Ensayo MASW

El perfil MASW-01, ubicado en la zona noroeste del área de estudio, en la Asociación Santa Rosa, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a un suelo de consistencia blanda (148-159 m/s) hasta los 2.3 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un material medianamente compacto a compacto (209-353 m/s) hasta los 11.0 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un material compacto a muy compacto (387-495 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 30.0 m. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 340 m/s.

El perfil MASW-02, ubicado en la zona noroeste del área de estudio, en la avenida Chillón, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a un suelo fino con consistencia media densa a densa (159-339 m/s) hasta los 5.3 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un material compacto a muy compacto (391-560 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 30.0 m. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 392 m/s.

El perfil MASW-03, ubicado en la zona norte del área de estudio, en Los Manantiales del Pinar, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a un suelo fino de consistencia blanda (164-179 m/s) hasta los 2.3 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un material medianamente compacto a compacto (247-331 m/s) hasta los 7.0 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un material compacto a muy compacto (365-565 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 30.0 m. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 376 m/s.

El perfil MASW-04, ubicado en la zona noreste del área de estudio, en el Parque Guillen, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a un material granular medianamente compacto a compacto (216-349 m/s) hasta los 3.7 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un material compacto a muy compacto (416-776 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 30.0 m. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 501 m/s.

El perfil MASW-06, ubicado en la zona centro del área de estudio, en el Parque 4, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a un material medianamente denso a denso (207-347 m/s) hasta los 8.9 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un material compacto a muy compacto (364-499 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 30.0 m. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 366 m/s.

El perfil MASW-07, ubicado en la zona este del área de estudio, en el Parque el Carmen, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a un material medianamente denso a denso (277-307 m/s) hasta los 2.3 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un material compacto a muy compacto (365-732 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 30.0 m. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 504 m/s.

El perfil MASW-08, ubicado en la zona sur del área de estudio, en el Parque Unión, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a una grava arenosa suelta a medianamente densa (221-307 m/s) hasta los 3.6 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra grava y arcilla (379-688 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 30.0 m. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 498 m/s.

El perfil MASW-09, ubicado en la zona sureste del área de estudio, en el Centro Cívico, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a grava arenosa semicompacto (270-324 m/s) hasta los 2.3 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un conglomerado grande (449-760 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 30.0 m. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 600 m/s.

El perfil MASW-10, ubicado en la zona sureste del área de estudio, en el jirón Alvarado, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a una arena bien gradada con limos de compacidad media a densa (232-318 m/s) hasta los 3.7 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un material compacto a muy compacto (363-630 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 30.0 m. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 431 m/s.

El perfil MASW-11, ubicado en la zona sur del área de estudio, en el Parque Héroes de la Policía, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a una arena limosa de compacidad media (136-148 m/s) hasta los 2.3 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra una grava pobremente gradada compacta (223-325 m/s) hasta los 11.0 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra cascajo con arena (357-576 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 30.0 m. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 333 m/s.

El perfil MASW-12, ubicado en la zona norte del área de estudio, en el Parque Sangarara, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a una arcilla limosa de consistencia medianamente densa a densa (215-330 m/s) hasta los 3.7 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra canto rodado más arcillas y finos (393-573 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 30.0 m. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 442 m/s.

4.5.2 Arreglos de Microtremores

La curva de dispersión generada de cada arreglo ejecutado, A-01 está compuesta por un arreglo lineal de 2m y arreglo circular de 5.5, 12.5, 25, 50, 100 y 200m.

Las velocidades de fase observadas se utilizan para estimar los parámetros desconocidos de las velocidades de onda cortante y los espesores del modelo de estructura de suelo 1-D.

Teniendo en cuenta el amplio rango de frecuencia de la velocidad de fase observada utilizada en nuestra exploración, nuestros perfiles VS en las partes más profundas pueden considerarse más confiables que los de los estudios MASW.

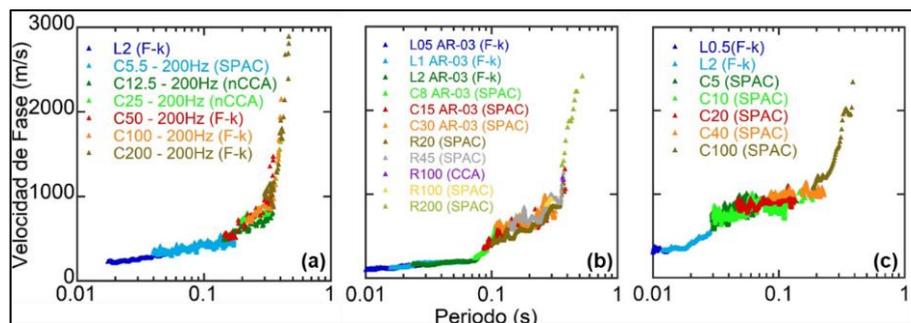


Figura N° 58: Curva de Dispersión generada para el arreglo (a) A-01, (b) A-02 y (c) A-03 –
Elaboración Propia.

Tabla N°25: Límites de búsqueda y resultados obtenido de la inversión para el perfil de velocidades.

ARREGLO	LÍMITES DE BUSQUEDA		ESTRATO FINAL	
	Vs (m/s)	H (m)	Vs (m/s)	H (m)
A-01	200-250	2-8	220	4.8
	250-350	8-20	320	14.5
	350-500	8-20	415	13.7
	500-950	15-40	732	23.3
	950-1600	50-100	1433	83.1
	1600-2500	50-100	1762	75.5
	2500-3800	-	3643	-
A-02	120-140	3-5	126	4.8
	410-450	3-4	439	3.2
	620-650	16-19	641	17.0
	750-800	50-100	775	95.1
	1000-1500	30-40	1204	36.6
	2500-2700	-	2606	-
A-03	300-320	2-4	311	3.0
	560-570	6-7	564	6.5
	780-800	15-25	789	21.7
	940-960	40-60	946	49.4
	1300-1500	110-130	1419	113.5
	2200-2700	-	2610	-

El perfil identificado como A-01, ubicado en la zona centro del área de estudio, en los Condominios de Comas, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden arcilla y grava (220-320 m/s) hasta 19.3 m de profundidad. Seguido inmediatamente por arcilla y cascajo (415-732 m/s) hasta los 56.2 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra arcilla (1433 m/s) hasta los 139.3 m de profundidad, seguido de este estrato se encuentran velocidades de ondas de corte que representan roca alterada (1762-3643 m/s) hasta la máxima

profundidad explorada de 350.0 m. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 323 m/s.

El perfil identificado como A-02, ubicado en la zona norte del área de estudio, en el Campo Deportivo San Carlos, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a un limo con arena (126 m/s) hasta 4.8 m de profundidad. Seguido inmediatamente por cantos rodados con grava arena y arcilla (439-641 m/s) hasta los 25.0 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra arcilla compacta con guijarros (775-1204 m/s) hasta los 156.7 m de profundidad, seguido de este estrato se encuentran velocidades de ondas de corte que representan roca alterada hasta la máxima profundidad explorada de 200.0 m, a esta profundidad se encontró una velocidad de ondas de corte de 2606 m/s. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 383 m/s.

El perfil identificado como A-03, ubicado en la zona sur del área de estudio, en el Parque Virgen de la Asunción, presenta velocidades de ondas de corte que corresponden a una grava pobremente gradada (311 m/s) hasta 3.0 m de profundidad. Seguido inmediatamente por un conglomerado grande (564 m/s) hasta los 9.5 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra cascajo con arcilla y caliche estratificado (789-1419 m/s) hasta los 194.1 m de profundidad, seguido de este estrato se encuentran velocidades de ondas de corte que representan roca alterada hasta la máxima profundidad explorada de 300.0 m, a esta profundidad se encontró una velocidad de ondas de corte de 2610 m/s. Para este perfil se tiene una velocidad de ondas de corte promedio en los 30.0 m (V_{s30}) de 636 m/s.

Se identificaron depósitos sedimentarios en la zona de estudio, razón por la cual se puede corroborar formulaciones. A continuación, se muestra la tabla resumen de comparación de resultados obtenidos

Tabla N°26: Aplicación de formulaciones empíricas para el cálculo de espesores de depósitos sedimentarios de diversos investigadores – Elaboración Propia.

Prof. Perfil	T(s)	COD.	K.M. 2019	G.L. 2010	M. 2007	H. 2004	P. 2002	K.O. 2018 RI	K.O. 2018 RS	C.C. 2017
220	0.69	A-01	60.8	66.3	64.9	88.1	60.7	99.2	242.4	68.5
160	0.60	A-02	49.4	55.7	49.2	74.6	48.9	91.9	229.6	55.2
	0.15		6.4	9.8	3.2	14.3	5.7	42.9	133.7	6.5
200	0.20	A-03	9.8	14.1	5.6	20.2	8.9	50.2	149.6	10.2

Se concluye que es necesario realizar más formulaciones ya que cada depósito tiene una formación diferente, la formulación que más se aproximó a la profundidad calculada fue la propuesta Karabulut Ozel (2018) para Roca Sísmica.

Los anexos contienen las Curvas de Dispersión, Verificación de los Perfiles Obtenido y Perfil de Velocidades de Ondas de Corte de las Mediciones de Arreglo de Microtemores Ejecutados.

4.6 DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDADES DE ONDAS DE COMPRESIÓN

Los ensayos ejecutados de Refracción Sísmica permitieron generar 11 perfiles bidimensionales de velocidades de ondas de compresión. Se caracterizaron los estratos del perfil del suelo en base a exploraciones geotécnicas recopiladas cercanas, para tener una adecuada descripción.

El perfil LS-01, ubicado en la zona noroeste del área de estudio, en la Asociación Santa Rosa, presenta suelo de consistencia blanda (~295 m/s) hasta los 3.5 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un material medianamente compacto a compacto (~580 m/s) hasta los 6.0 m de profundidad, seguido por un suelo probablemente saturado (1260-1780 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 16.0 m, a esta profundidad se encontró una máxima velocidad de ondas de compresión de 1780 m/s.

El perfil LS-02, ubicado en la zona noroeste del área de estudio, en la avenida Chillón, presenta suelo fino con consistencia media densa a densa (~410 m/s) hasta los 3.5 m de profundidad, seguido por un suelo probablemente saturado (1355-2015 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 16.0 m, a esta profundidad se encontró una máxima velocidad de ondas de compresión de 2015 m/s.

El perfil LS-03, ubicado en la zona norte del área de estudio, en Los Manantiales del Pinar, presenta material medianamente compacto a compacto (410-700 m/s) hasta los 6.0 m de profundidad, seguido por un material compacto a muy compacto (~840 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 16.0 m, a esta profundidad se encontró una máxima velocidad de ondas de compresión de 840 m/s.

El perfil LS-04, ubicado en la zona noroeste del área de estudio, en el Parque Guillen, presenta suelo de consistencia blanda (~330 m/s) hasta los 1.5 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un material granular medianamente compacto a compacto (~500 m/s) hasta los 2.5 m de profundidad, seguido por un material compacto a muy compacto (790-920 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 16.0 m, a esta profundidad se encontró una máxima velocidad de ondas de compresión de 920 m/s.

El perfil LS-05, ubicado en la zona oeste del área de estudio, en la Urbanización María Auxiliadora, presenta material medianamente compacto a compacto (~470 m/s) hasta los 2.5 m de profundidad, seguido por un suelo probablemente saturado (1210-2160 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 16.0 m, a esta profundidad se encontró una máxima velocidad de ondas de compresión de 2160 m/s.

El perfil LS-06, ubicado en la zona centro del área de estudio, en el Parque 4, presenta suelo de consistencia blanda (~360 m/s) hasta los 3.5 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra un material medianamente denso a denso (~540 m/s) hasta los 6.0 m de profundidad, seguido por un suelo probablemente saturado (1410-2550 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 16.0 m, a esta profundidad se encontró una máxima velocidad de ondas de compresión de 2550 m/s.

El perfil LS-07, ubicado en la zona este del área de estudio, en el Parque el Carmen, presenta material medianamente denso a denso (480-690 m/s) hasta los 2.5 m de profundidad, seguido por un material compacto a muy compacto (780-790 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 16.0 m, a esta profundidad se encontró una máxima velocidad de ondas de compresión de 790 m/s.

El perfil LS-08, ubicado en la zona centro del área de estudio, en el Parque 4, presenta grava arenosa suelta (~395 m/s) hasta los 2.5 m de profundidad, subyaciendo a este estrato se encuentra grava arenosa medianamente densa (~450 m/s) hasta los 3.5 m de profundidad, seguido por un suelo probablemente saturado (1340-1520 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 16.0 m, a esta profundidad se encontró una máxima velocidad de ondas de compresión de 1520 m/s.

El perfil LS-09, ubicado en la zona sureste del área de estudio, en el Centro Cívico, presenta grava arenosa semicompacto (490-580 m/s) hasta los 2.5 m de profundidad, seguido por un suelo probablemente saturado (1210-1470 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 16.0 m, a esta profundidad se encontró una máxima velocidad de ondas de compresión de 1470 m/s.

El perfil LS-10, ubicado en la zona sur del área de estudio, en el Parque Héroes de la Policía, presenta material granular medianamente compacto (310-390 m/s) hasta los 3.5 m de profundidad, seguido por un material granular compacto (~670 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 16.0 m, a esta profundidad se encontró una máxima velocidad de ondas de compresión de 670 m/s.

El perfil LS-11, ubicado en la zona norte del área de estudio, en el Parque Sangarara, presenta suelo de consistencia blanda (330-900 m/s) hasta los 1.5 m de profundidad, seguido por un material compacto (900-1070 m/s) hasta la máxima profundidad explorada de 16.0 m, a esta profundidad se encontró una máxima velocidad de ondas de compresión de 1070 m/s.

Se calcularon los parámetros dinámicos del suelo en función a las velocidades de ondas de corte (V_s) y de compresión (V_p), como: el coeficiente Poisson, Modulo Cortante Máximo y Modulo Elástico de Young.

Tabla N°27: Parámetros Dinámicos de los Ensayos Geofísicos Ejecutados – Elaboración Propia.

Línea Sísmica	Prof. (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Densidad (g/cm^3)	ν	$G_{máx}$ (kg/cm^2)	E_d (kg/cm^2)
1	2.3	296	159	1.8	0.25	449	112
	5.9	569	295	1.8	0.27	1597	405
2	3.5	411	249	1.8	0.16	1124	261
	5.9	723	331	1.8	0.32	2021	535
3	16.0	853	445	1.9	0.26	3756	949
	2.5	531	242	1.8	0.33	1062	282
4	16.0	925	571	1.9	0.15	6340	1454
	2.5	471	227	1.8	0.30	931	243
5	3.5	362	229	1.8	0.12	949	213
	6.0	595	329	1.8	0.23	1999	492
6	2.5	708	307	1.8	0.34	1730	465
	16.0	787	546	1.9	0.02	5772	1182
7	2.5	402	248	1.8	0.15	1113	256
	3.5	442	307	1.8	0.03	1729	355

Línea Sísmica	Prof. (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (g/cm ³)	ν	$G_{máx}$ (kg/cm ²)	E_d (kg/cm ²)
9	2.5	617	324	1.8	0.26	1932	487
10	3.7	389	223	1.8	0.20	898	216
	16.0	672	438	1.9	0.10	3619	794
11	1.5	404	215	1.7	0.25	793	199
	16.0	1068	496	1.7	0.32	4215	1111

4.7 MAPAS DE V_{s30}

Se procedió a realizar un análisis de los cocientes espectrales H/V obtenidos de los Ensayos MASW y Medición de Microtremores Ejecutados, donde se visualiza desarrollos similares de los cocientes espectrales de los ensayos analizados. Se compara los valores del periodo predominante calculado (T_0) del Ensayo MASW Ejecutado y los periodos predominantes obtenidos (T) del Ensayo de Medición de Microtremores. Se concluye que solo 3 mediciones existen la aproximación de periodo calculado y observado.

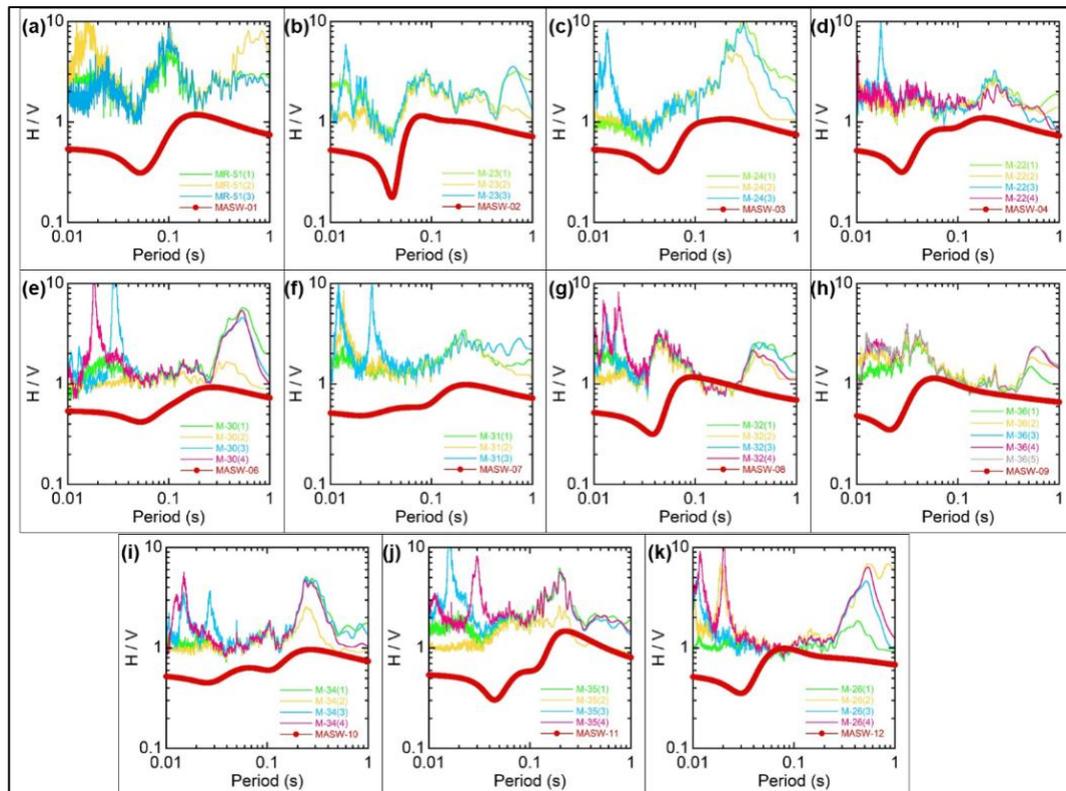


Figura N° 59: Comparación de Cocientes Espectrales de los Ensayos MASW Ejecutados con Medición de Microtremores cercanos – Elaboración Propia.

Para generar el Mapa de Vs30 se consideró para el análisis un total de 64 perfiles de velocidades de ondas de corte. Se calcula el parámetro normalizado Vs30 de la información disponible, para poder delimitar las propiedades del suelo de acuerdo a la norma peruana E030 (2019) y ASCE.

Tabla N°28: Parámetros calculados de los Perfiles de Velocidades de Ondas de Corte, Ensayo MASW Ejecutados – Elaboración Propia.

MASW	Vs30	$T_o = \frac{4h}{V_s}$	T Obs.	MASW	Vs30	$T_o = \frac{4h}{V_s}$	T Obs.
MASW-01	339.68	0.35	0.10	MASW-08	497.73	0.24	0.45
MASW-02	392.02	0.31	0.70	MASW-09	599.82	0.20	0.59
MASW-03	375.89	0.32	0.09	MASW-10	430.56	0.28	0.26
MASW-04	501.11	0.24	0.23	MASW-11	333.35	0.36	0.16
MASW-06	365.63	0.33	0.07	MASW-12	441.90	0.27	0.52
MASW-07	504.44	0.24	0.21				

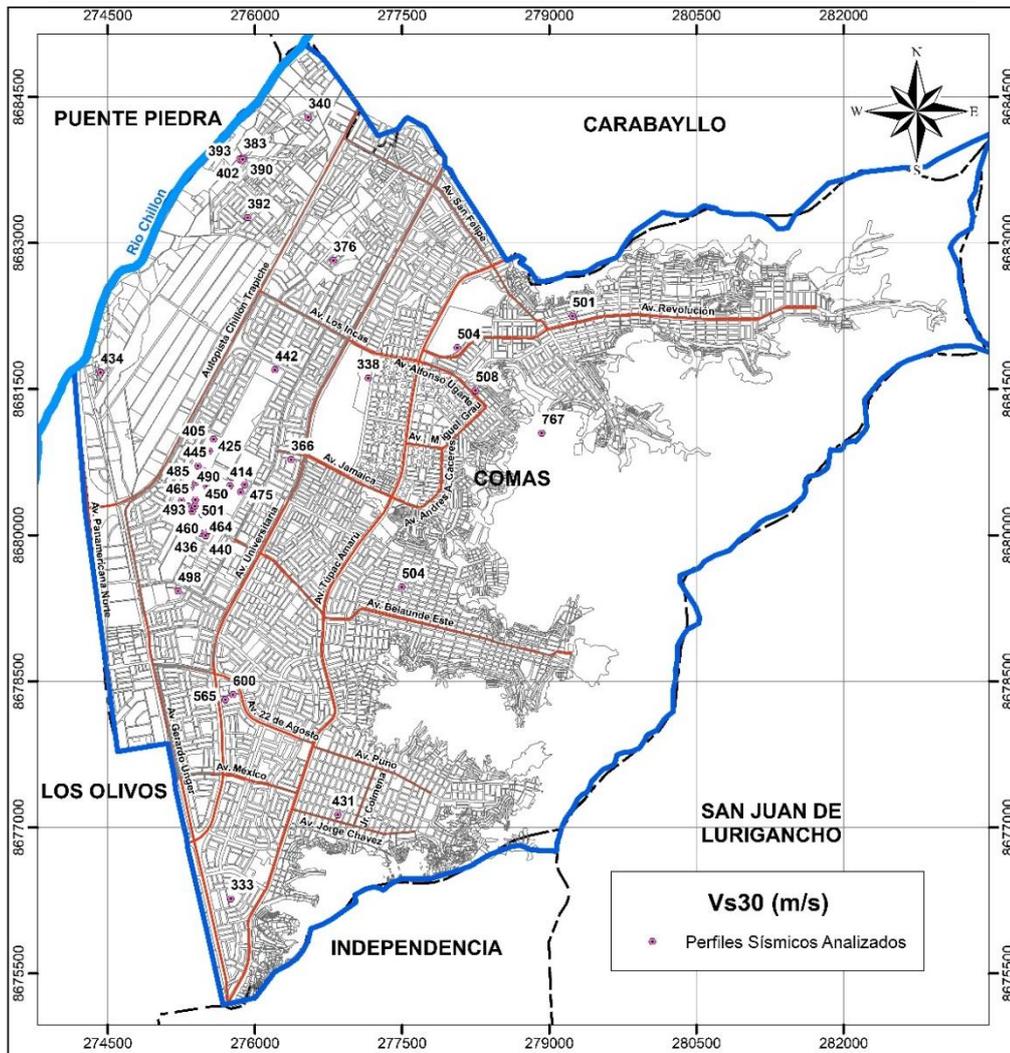


Figura N° 60: Mapa de Vs30 de ensayos MASW recopilados y ejecutados – Elaboración Propia.

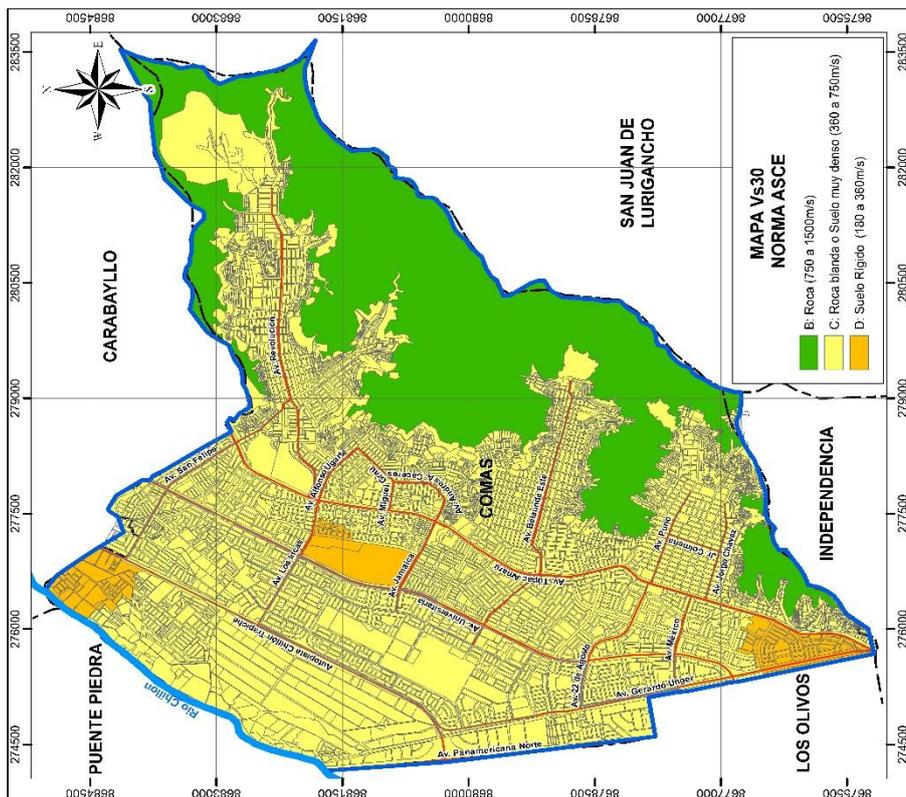


Figura N° 61: Mapa Vs30 aplicando la Normativa ASCE – Elaboración Propia.

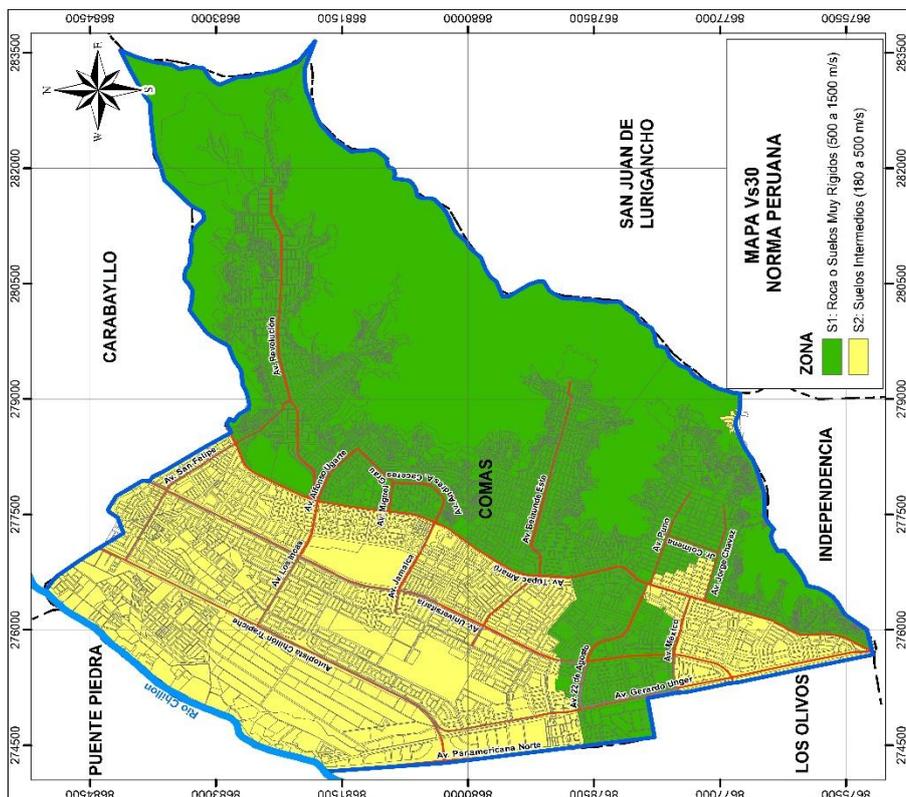


Figura N° 62: Mapa Vs30 aplicando la Normativa Peruana E0.30 Diseño Sismorresistente – Elaboración Propia.

4.8 MAPAS DE ZONAS DE ISOPERIODOS

Se ha desarrollado dos Mapas de Isoperiodos, esto se debe al comportamiento identificado en la zona llana del distrito se registra el desarrollo de dos picos en los espectros H/V obtenidos de las pruebas complementarias ejecutadas. Se identificaron zonas con dos picos predominantes que indicaría la presencia de más de una impedancia a profundidad (Woolery & Street, 2002), por lo que se procedió a generar dos mapas de Isoperiodos. El primer mapa zonifica la zona de estudio considerando la presencia de periodo fundamental $>0.3s$; mientras que el segundo mapa considera periodo fundamental $\leq 0.2s$.

4.8.1 Zona I

La zona I comprende el área con períodos de vibración menores o igual a 0.20s. Esta zona se encuentra en toda la zona del área de estudio. Las características dinámicas de vibración de esta zona corresponden a un suelo rígido. Según los perfiles MASW-04, MASW-07 y MASW-10 en los anexos, presentan estratos rígidos a partir de los 2.5 m de profundidad en promedio y a la máxima profundidad explorada de 30.0 m presentan velocidades de ondas de corte desde 629 m/s hasta 775 m/s, representando estratos rígidos de material compacto a muy compacto.

4.8.2 Zona II

La zona II comprende el área con períodos de vibración de 0.20s a 0.30s. Esta zona no se encuentra en la zona del área de estudio. A pesar de tener identificado cuatro puntos de exploración mediante mediciones de microtemores, de los cuales tres están ubicados en la zona abrupta de la geografía del distrito de Comas (M-22, M-31 y M-34). Estos puntos en la zona abrupta están asociados a suelos rígidos, compuestos por conglomerados. El cuarto punto (M-49) se localiza en la zona llana, donde se ubica la estación acelerográfica, con un valor de 0.22 segundos como período predominante. Tomando en consideración la geología del lugar, caracterizado por la presencia de suelos medianamente flexibles en la zona llana y conglomerados en las colinas, permite definir la clasificación de la zona. Por lo antes mencionado, y considerando la composición geotécnica, se optó por caracterizar estos puntos de exploración como área como Zona I a pesar de los valores de periodos de vibración de 0.2 a 0.3.

4.8.3 Zona III

La zona III comprende el área con períodos de vibración de 0.30s a 0.50s. Esta zona se encuentra en una parte del Sur y Centro del área de estudio. Las características dinámicas de vibración de esta zona corresponden a un suelo medianamente flexible. Según los perfiles MASW-06, MASW-08 y MASW-11 de los anexos, presentan estratos sueltos a medianamente denso de espesores entre 2.3 m y 11.0 m, a la máxima profundidad explorada de 30.0 m en promedio presentan velocidad de ondas de corte desde 499 m/s hasta 687 m/s, representando estratos de material granular y fino.

4.8.4 Zona IV

La zona IV comprende el área con períodos de vibración desde 0.50s hasta alrededor de 1 s. Esta zona se encuentra predominantemente en la parte noroeste y suroeste del área de estudio. Las características dinámicas de vibración de esta zona corresponden a un suelo flexible a muy flexible. Según los perfiles MASW-01, MASW-02, MASW-03, MASW-09, y MASW-12 de los anexos, existe un estrato de gran potencia de material granular suelto a medianamente denso hasta los 11.0 m de profundidad aproximadamente y a la máxima profundidad explorada de 30.0 m presenta velocidad de ondas de corte de 495 m/s aproximadamente con aumento en la rigidez para mayores profundidades.

Adicionalmente, el perfil A-01, A-02 y A-03 de los anexos contiene caracterizas de la zona central, norte y sur, respectivamente. Se identifica un periodo mayor a 0.5s, con presencia de suelos de consistencia blanda a muy denso desde los 4.7 m a 56.0 m de profundidad llegando a velocidades de ondas de corte de 731 m/s, con lo que se puede concluir que, los estratos de mayor rigidez se encuentran a profundidades mucho mayores.

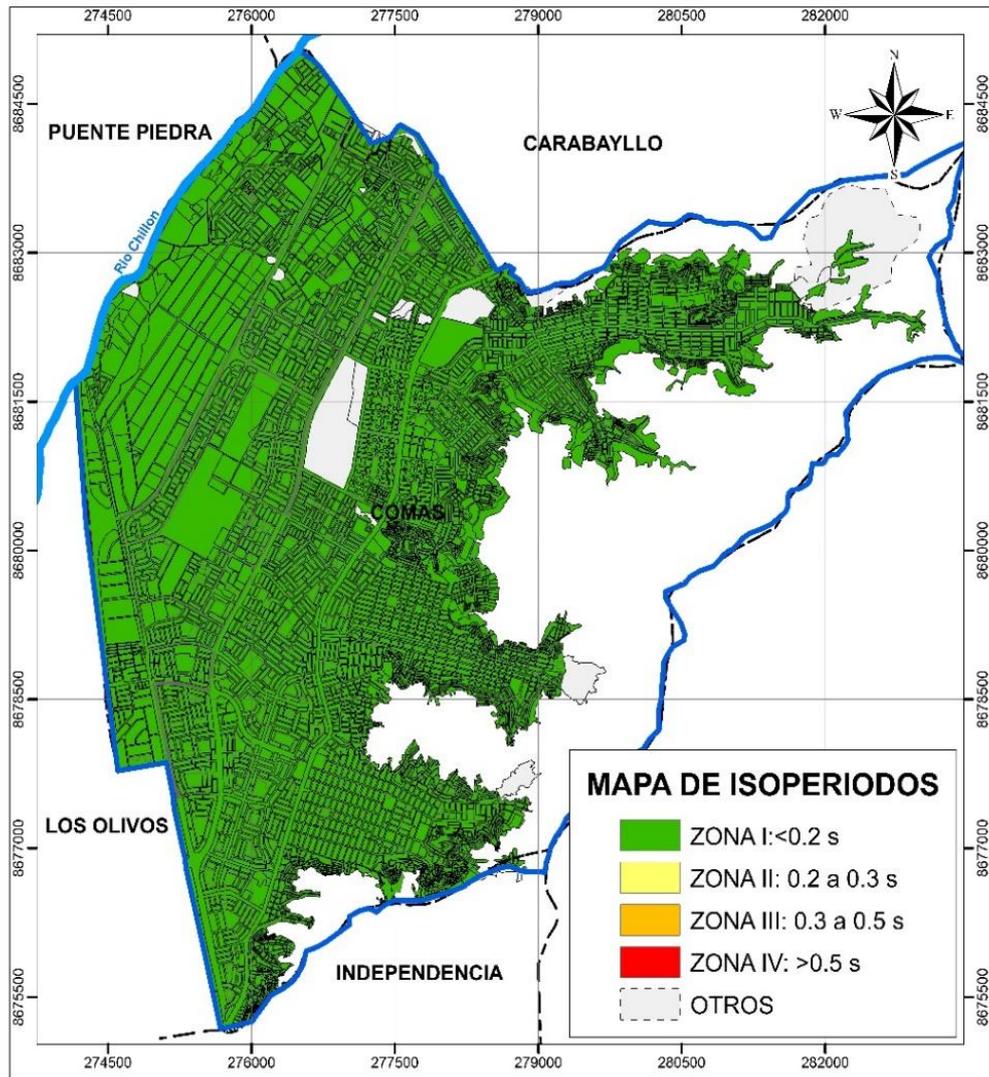


Figura N° 63: Mapa de Isoperiodos considerando el periodo fundamental $\leq 0.2\text{s}$ para la zona baja del distrito – Elaboración Propia.

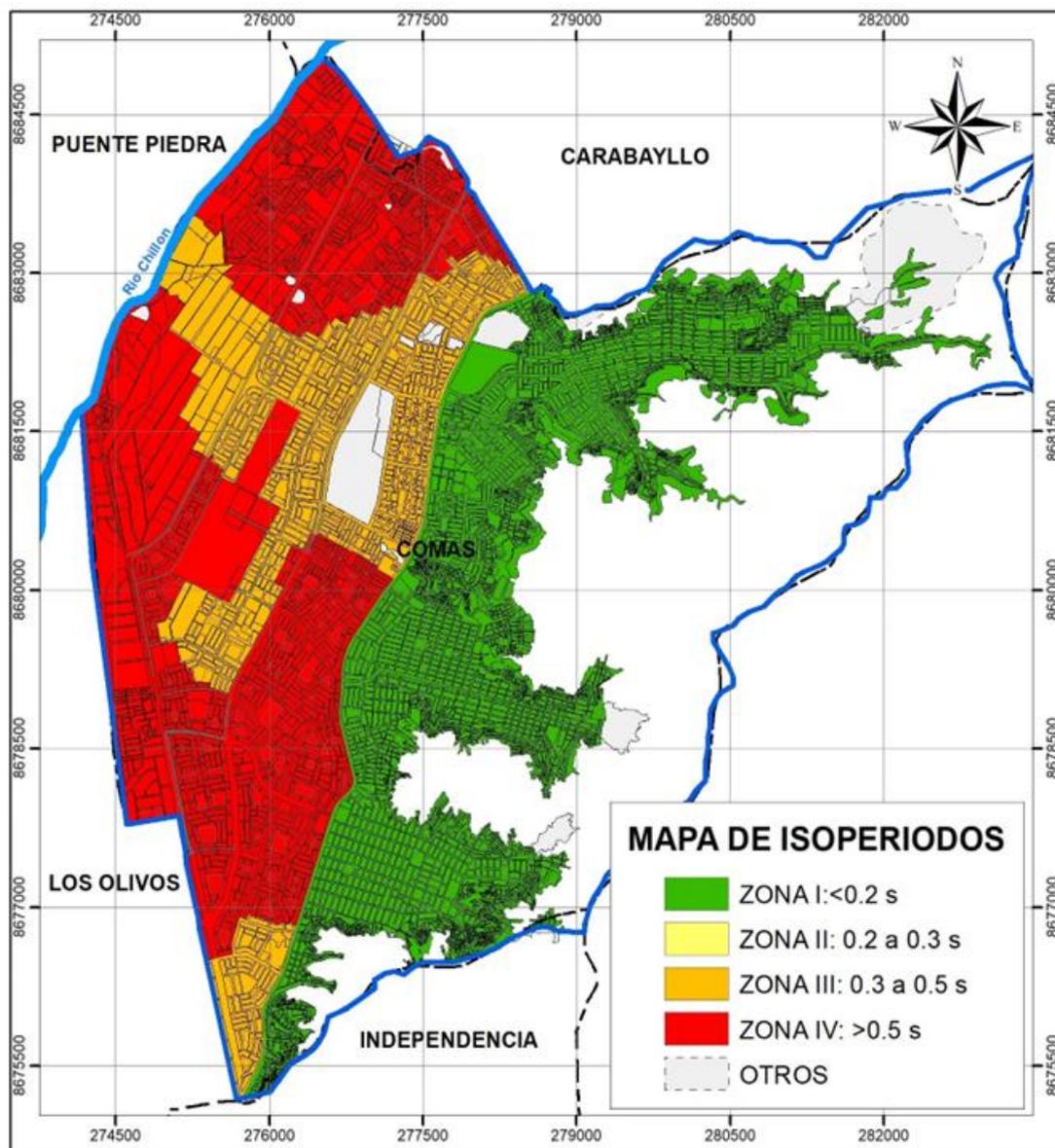


Figura N° 64: Mapa de Isoperiodos considerando el periodo fundamental $> 0.3\text{s}$ para la zona baja del distrito – Elaboración Propia.

CAPÍTULO V: EVALUACIÓN DE PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO

5.1 INTRODUCCIÓN.

La sismicidad en el Perú, se caracteriza por el fenómeno de subducción. Silgado (1968, 1978, 1985) y Dorbath (1990) han logrado la recopilación más completa de la historia sísmica del Perú desde el siglo XIV hasta el siglo XIX, periodo en el cual los eventos sísmicos de gran importancia fueron descritos.

A lo largo de la línea costera se tienen identificada la presencia de focos a nivel superficial ($60 \text{ m} > h$), lo que produciría sismos de magnitud elevada con relativa frecuencia. La sismicidad con profundidad intermedia ($60 \text{ m} < h \leq 350 \text{ m}$) se distribuye de manera irregular, en la zona sur del país presenta mayor índice de sismicidad con un ángulo de buzamiento (promedio 30°), la profundidad focal de los sismos aumenta. A diferencia de la zona sísmica con foco profundo ($h > 350 \text{ km}$), se tiene identificada en la región Centro y Sur del Llano Amazónico (SENCICO, 2016).

Para el cálculo de peligro sísmico probabilístico se empleó el Programa R-CRISIS 2020. Primero, se identifica la distribución espacial sísmica que puede afectar a la zona de estudio, a través de las fuentes sismogénicas y los parámetros sismogénicos. Para la presente investigación se empleó la información brindada por SENCICO (2016). Finalmente, se aplica las leyes de atenuación para evaluar el peligro sísmico, se obtienen las aceleraciones espectrales para distintos periodos y los espectros de peligro uniforme en roca (Suelo B). Para la evaluación se consideró un enmallado que cubre toda el área de estudio.

5.2 GENERALIDADES

5.2.1 Antecedentes

SENCICO (2016) brinda fuentes sismogénicas actualizadas (1555 hasta enero 2016), lo cual nos permitiría realizar un análisis sísmico probabilístico con registros sísmico hasta dicha fecha. Para el análisis de peligro sísmico se empleó las ponderaciones de las leyes de atenuación presentadas por Charcas (2018), permitiendo determinan niveles máximos de solicitaciones sísmicas en el distrito de Comas. Existen estudios previos realizados por el CISMID (2011) y el Aplicativo

Web SENCICO, permitirán hacer las comparaciones para validar los resultados obtenidos.

5.2.2 Alcances

El análisis de Peligro Sísmico es importante para el cálculo de aceleraciones máximas que pueden suceder en el área de estudio en caso de un sismo de magnitud considerable, dichas solicitaciones sísmicas permiten analizar los diseños de las edificaciones existentes y futuras. Razón por la cual es importante emplear fuentes sismogénicas de catálogos que estén lo más actualizado posibles, para poder hacer predicciones de nuestra realidad lo más conservadora posible.

El estudio de Peligro Sísmico en el Distrito de Comas permite la evaluación en toda la zona de estudio, mediante un enmallado de 25 puntos teniendo cada punto evaluado una separación de 0.025° . Se evaluaron 3 leyes de atenuación para las fuentes sismogénicas de subducción y 4 leyes de atenuación para las fuentes sismogénicas continentales para el suelo tipo B de acuerdo a la clasificación de suelos IBC.

5.3 FUENTES SÍSMICAS

Se empleó las Fuentes Sísmicas proporcionadas por SENCICO (2016), el catálogo sísmico fue constituido bajo las siguientes consideraciones:

- La Homogenización de Datos (M_w) fue empleada debido a que las distintas entidades poseían medidas de magnitud diferentes.
- La Eliminación de Eventos Duplicados se realiza en función al tiempo de registro, distancia y magnitud del evento sísmicos; además no considero eventos que no se conocieran su profundidad de ocurrencia.
- La depuración del catálogo considera el modelo de Poisson que indica que cada evento sísmico es independiente, replicas o eventos premonitorios fueron eliminados del catálogo.

Solo se evaluó 12919 eventos principales, las magnitudes (M_w) presentan los siguientes rangos: entre 4.0 a 5.0, son 52 años de observación; entre 5.1 a 6.0 son 56 años de observación, para las magnitudes de 6.1 a 7.0 son 62 años, y para eventos con 7.1 a 8.0 son 110 años de observación (SENCICO, 2016).

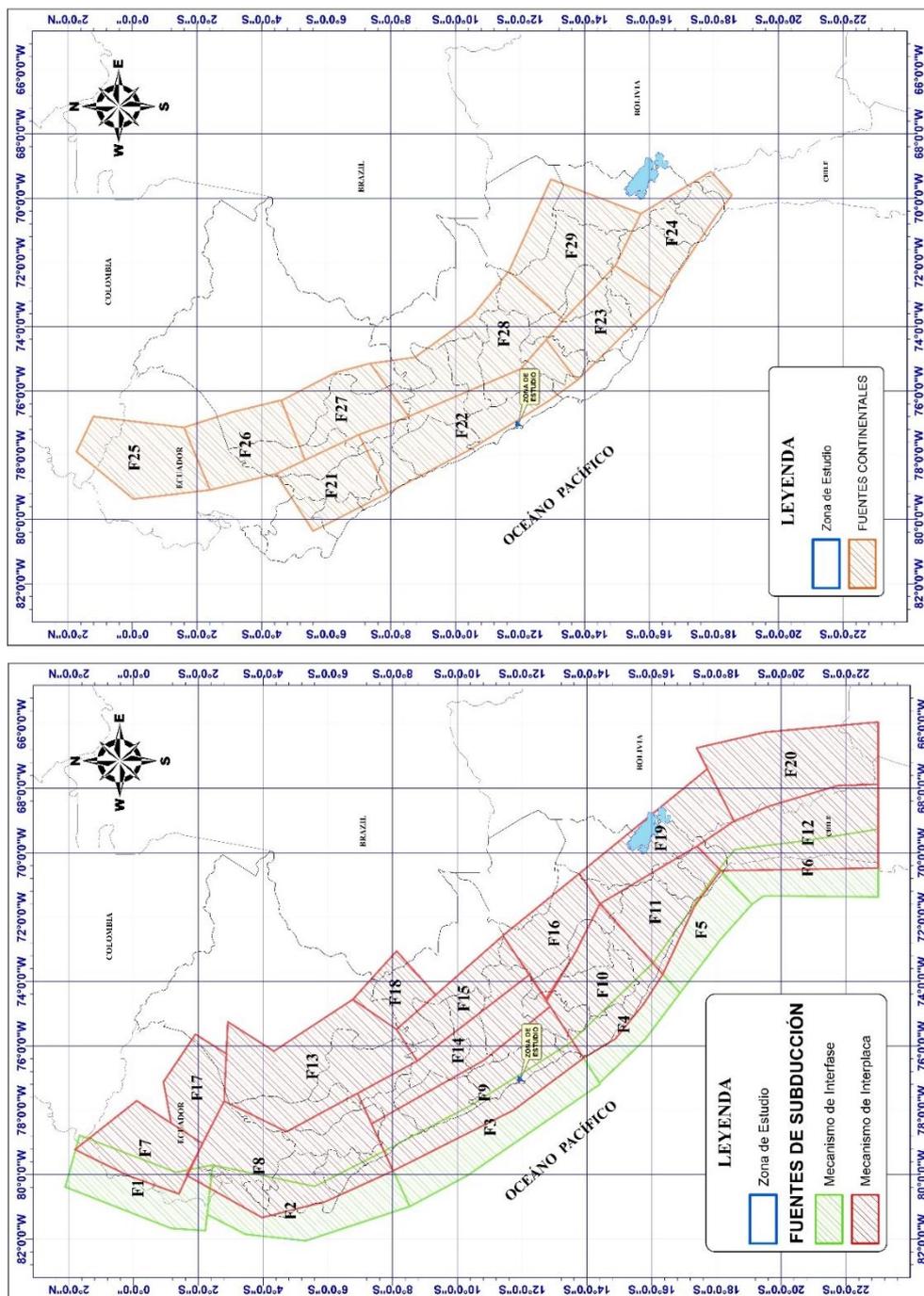


Figura N°65: Fuentes Sismogénicas de Subducción y Continentales propuestas por SENCICO 2016— Elaboración Propia.

La determinación de las fuentes sismogénicas se basa en la agrupación de los sismos de acuerdo a su origen (subducción o continental). Son 20 fuentes sismogénicas de subducción en función de sus mecanismos de Interfase (F1- F6), de interplaca superficial (F7-F16) e intermedias (F17-F20); 9 fuentes sísmicas continentales (F21- F29). La geometría de estas fuentes es concordante al modelo de subducción propuesto por Cahill e Isacks (1992) (SENCICO, 2016).

5.4 PARÁMETROS DE RECURRENCIA SÍSMICA

El análisis de recurrencia sísmico emplea el modelo de Gutenberg y Richter (G-R) y el ajuste de máxima verosimilitud propuesto por Weichert (1980). Los parámetros de recurrencia que estima la máxima probabilidad de los parámetros tasa y beta (N_0 y β).

Tabla N°29: Parámetros Sismológicos Empleados para las Fuentes Sismogénicas. Tomado de SENCICO (2016)

Fuente	Parámetros Sismológicos				Fuente	Parámetros Sismológicos			
	M_{min}	M_{max}	β	Tasa		M_{min}	M_{max}	β	Tasa
F1	4.3	8.8±2	1.286	3.100	F16	4.1	8.0±0.2	1.307	1.250
F2	4.5	8.8±2	1.302	4.200	F17	4.4	8.0±0.2	1.697	3.870
F3	4.8	8.8±2	1.732	3.980	F18	4.8	8.0±0.2	2.413	3.130
F4	4.4	8.8±2	1.730	6.620	F19	4.8	8.0±0.2	2.307	2.920
F5	4.8	8.8±2	1.473	2.580	F20	4.5	8.0±0.2	2.352	11.700
F6	4.5	8.8±2	1.344	3.530	F21	4.0	7.1	0.580	0.461
F7	4.1	8.0±0.2	0.991	1.300	F22	4.1	7.2	1.068	1.320
F8	4.4	8.0±0.2	1.990	3.380	F23	4.5	7.0	1.384	0.675
F9	4.5	8.0±0.2	1.939	6.510	F24	4.4	7.4	1.314	1.280
F10	4.5	8.0±0.2	1.805	6.570	F25	4.2	7.0	1.133	2.040
F11	4.8	8.0±0.2	2.251	4.850	F26	4.6	6.7	1.384	0.889
F12	4.8	8.0±0.2	2.580	19.000	F27	4.8	6.8	2.162	1.270
F13	4.3	8.0±0.2	1.491	3.710	F28	4.5	7.0	1.667	2.850
F14	4.2	8.0±0.2	1.280	2.070	F29	4.3	7.1	1.259	1.420
F15	4.6	8.0±0.2	2.334	2.520					

5.5 ECUACIONES DE PREDICCIÓN DE MOVIMIENTO (GMPE)

La evaluación del PGA (*Peak ground acceleration*) obtenida a través de las leyes de atenuación, permitirá la representación de las leyes de recurrencia empleadas. GMPE's (*Ground-motion prediction equation*) son una importante componente en ingeniería sismorresistente y en los análisis probabilísticos de peligro sísmico. Charcas (2018) elaboró un estudio que analiza las leyes de atenuación sísmica que se emplean en el Perú. Evaluó la confiabilidad de las leyes en función de la bondad del ajuste, el método que se utilizó fue LLH (*Log Linear Histograms*) propuesto por Scherbaum (2009). Además, verifico la validación de las leyes de atenuación con la metodología propuesta por Cotton (2006) para que sean estadísticamente aceptable en una región. Concluyo, que las leyes de Young

(1997), Zhao (2016a) y Abrahamson (2016) para sismos de subducción son aceptables a la realidad del Perú.

Tabla N°30: Resumen de las características de las leyes de atenuación analizadas. Tomado de Charca (2018)

Referencia	Región	T _{MÁX}	R	[R]	[M]	H _{MÁX}	Clasif. de Sitio
Young et al. (1997)	Mundial	Roca = 3.0 s Suelo = 4.0 s	e = R _{RUP} a = R _{RUP}	10-500 km	Mw>5.0	130 km	2 clases discretas (Roca y Suelo)
Abrahamson et al. (2016)	Mundial	10.0 s	e = R _{RUP} a = R _{HIP}	0-300 km	e= Mw>6.0 a= Mw>5.0	120 km	V _{S30} continuo
Zhao et al. (2016)	Japón	5.0 s	e = R _{RUP} a = R _{RUP}	0-300 km	Mw>5.0	-	4 clases discretas

T_{MÁX}: Máximo periodo de los espectros de respuesta

R: Tipo de distancia usada en el modelo; R_{RUP} (distancia más corta a la superficie de ruptura) y R_{HIP} (distancia hipocentral)

Tipo de subducción: e (Interfase) y a (intraplaca)

[R]: Rango de distancias de aplicación recomendados por los autores

[M]: Rango de magnitudes recomendados por los autores

H_{MÁX}: Profundidad máxima del foco para la cual los autores recomiendan el uso de las leyes de atenuación.

El análisis probabilístico del peligro sísmico considera todos los escenarios posibles en suelo tipo B. Los sismos de subducción intraplaca tienen mayor influencia en el peligro sísmico en la mayor parte del territorio (Charca et al., 2018).

Tabla N°31: Ponderación estimada para cada ley de atenuación para sismos de subducción Interfase por la de intraplaca. Tomado de Charca (2018)

Sismogénesis	Ley de atenuación	Suelo tipo B
Subducción interfase	Abrahamson (2016)	0.40
	Zhao et al. (2016b)	0.35
	Young et al. (1997)	0.25
Subducción intraplaca	Abrahamson (2016)	0.40
	Zhao et al. (2016a)	0.35
	Youngs et al. (1997)	0.25

Young y Zhao que presenta un mejor ajuste en todo el rango de periodos. Young (1997) presenta un buen ajuste para sismos de subducción de Interfase, a diferencia de los sismos de intraplaca para periodos mayores a 0.5 s sobrepasa el error de ajuste de bondad. Zhao (2016a) presento un mejor ajuste en el todo el rango de periodos, evidenciándose la efectividad de la ley en función de la comparación de aceleraciones observadas y teóricas (Charca et al., 2018).

5.5.1 Ecuación de Atenuación de Young (1997)

Ley de atenuación de Young (1997) fue generada con el modelo de regresión para sismos de $M_w \geq 5$, distancias entre 10 a 500 Km. La base de datos fue recopilada de Alaska, Chile, Cascadia, Japón, México, Perú (11 registros) y las islas Salomón. Los parámetros de las fuentes sísmicas (localización epicentral, profundidad, magnitud y mecanismo focal) fueron obtenidos de publicaciones especiales o del *Harvard Centroid Moment tensor solutions*. Young propuso un modelo básico de regresión para roca, al mismo tiempo se derivó el modelo para poder analizar el suelo, forzando la convergencia de predicciones y generando la sobrevaloración de magnitudes resultantes.

Relación de atenuación para la respuesta horizontal espectral de aceleración (5% amortiguamiento) propuesta por Young para sismos de subducción en roca:

$$\ln(Sa) = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818 e^{0.554M}) + 0.00607 H + 0.3846 Zt \quad \text{Ecuación 20}$$

Young propuso ley de atenuación para suelo, pero de acuerdo a las clasificaciones está en el suelo Tipo D, la formulación es la siguiente:

$$\ln(Sa) = -0.6687 + 1.438M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.097 e^{0.617M}) + 0.00648 H + 0.3643 Zt \quad \text{Ecuación 21}$$

5.5.2 Ecuación de Atenuación Abrahamson (2016)

La data utilizada incluye 2590 registros de 63 sismos intraplaca ($5.0 \leq M \leq 7.9$) y 953 registros de 43 sismos de Interfase ($6.0 \leq M \leq 8.4$) para distancias de hasta 300 km. Se tomó como límite la $M_w = 8$, para valores mayores se incluyó un modelo básico basado en simulaciones numéricas de sismos de Interfase de Cascadia. Se adiciono los eventos sísmicos obtenidos de los países de Japón, Taiwán, México, Sur y Centro América. La data emplea los siguientes parámetros: Momento magnitud, tipo de evento (Interfase e intraplaca), ubicación epicentral y profundidad, locación de estaciones, clasificación de sitio, clasificación *forearc* o *backarc*, distancias métricas (distancia de ruptura y distancia hipocentral) y V_{S30} (Abrahamson et al., 2016).

Se realizó la clasificación de sitio en función del V_{S30} con restricción en la amplificación de sitio no lineal. Para una distancia menor a 100 km el modelo de BC Hydro predice movimientos medianos que caen dentro del rango del actual

GMPE's. A largas distancias, el modelo de BC Hydro predice bajos movimientos basados en atenuaciones fuertes. Para largas distancias y magnitudes, el modelo BC Hydro tiende a limitar el rango del modelo de predicción GMPE para eventos intraplaca (Abrahamson et al., 2016).

La clasificación de sitio se basó en la clasificación NEHRP en función del V_{S30} , donde no se tenía el V_{S30} , se usaron correlaciones con el NEHRP. La data recolectada tiene como valor máximo a 7.5 de magnitud, se excluyó para sismo de Interfase valores menores a 6 y para sismos de intraplaca valores menores a 5.

La siguiente ley de atenuación emplea el análisis de regresión:

$$\begin{aligned} \ln(S_{a \text{ interface}}) = & \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 \\ & + (\theta_2 + \theta_3(M - 7.8)) \ln(R_{rup} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) \\ & + \theta_6 R_{rup} + f_{mag}(M) + f_{FABA}(R_{rup}) + f_{site}(PGA_{1100}, V_{S30}) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$\begin{aligned} \ln(S_{a \text{ slab}}) = & \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 \\ & + (\theta_2 + \theta_{14} F_{event} \\ & + \theta_3(M - 7.8)) \ln(R_{hypo} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) + \theta_6 R_{hypo} \\ & + \theta_{10} F_{event} + f_{mag}(M) + f_{depth}(Z_h) + f_{FABA}(R_{hypo}) \\ & + f_{site}(PGA_{1100}, V_{S30}) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 23}$$

5.5.3 Ecuación de Atenuación Zhao (2016)

Esta ley de atenuación está incluida en *Next Generation Attenuation* (NGA) la cual modela principalmente basándose en registros sísmicos como California, Japón, Taiwán y Turquía. Abrahamson (2016) desarrollo el modelo más reciente para registros de movimiento fuerte a partir de terremotos de subducción global. Su conjunto de datos para eventos de interfaz contiene muchos menos registros de movimiento fuerte que el conjunto de datos utilizado en el estudio de Zhao. Para $M_w \geq 7.1$ se utilizó una función bilineal de magnitud.

Se empleó la clasificación de sitio del *National Earthquake Hazards Reduction Program* (NEHRP), en lugares donde no se tenía identificado su clasificación se infirió en función de H/V registrado o descripción geológica. Zhao (2016a) clasifico las características de Sitio en SC I, SC II, SC III y SC IV. Correspondientes

aproximadamente a cuatro clases: roca, suelo rígido, suelo medianamente rígido, y suelo blando.

Se propuso diferentes leyes de atenuación para sismos de subducción de Interfase e intraplaca, con buen ajuste de desviación estándar y bondad. La ley de atenuación para eventos de subducción fue mejorada dentro del rango de todos los periodos espectrales. Los coeficientes generados para las leyes de atenuación, fueron obtenidos de la base de registros que cuentan con un perfil de velocidad de onda de corte hasta la roca ingenieril (Zhao et al., 2016b).

Sismos de Subducción Intraplaca

La siguiente ley de atenuación brinda aceleración para 5% de amortiguamiento (Zhao, y otros, 2016a):

$$\ln(Sa_{i,j}) = f_{mSL} + C_5 \ln(r_{i,j}) + C_7 \ln(x_{i,j} + 200.0) + C_8 x_{i,j} + q_{SLH} x_{i,j} + C_{10} x_{i,j}^v + C_{11} + \ln(A) + \xi_{i,j} + \eta_i \quad \text{Ecuación 24}$$

Sismos de Subducción Interfase

La siguiente ley de atenuación dará picos de aceleración para 5% de amortiguamiento:

$$\ln(Sa_{i,j}) = f_{mintS} + C_6 \ln(r_{i,j}) + C_8 \ln(x_{i,j} + 200.0) + C_9 x_{i,j} + C_{10} x_{i,j}^v + C_{11} + \ln(A) + \xi_{i,j} + \eta_i \quad \text{Ecuación 25}$$

La siguiente ecuación se utilizó para registros de interfaz profunda (>25Km):

$$\ln(Sa_{i,j}) = f_{mintD} + C_6 \ln(r_{i,j}) + C_{12} \ln(x_{i,j} + 200.0) + C_{10} x_{i,j}^v + C_{11} + \ln(A) + \xi_{i,j} + \eta_i \quad \text{Ecuación 26}$$

Para eventos de sismos de Interfase superficial se utilizará k=2 (SC II) y para sismos profundos de Interfase k=5 (SC II), se utilizarán las mismas formulaciones para el cálculo de índice no lineal de amplificación anterior.

5.5.4 Ecuación de Atenuación Sadigh (1997)

La data recolectada procede de sismos de California, Gazli, Tabas, Unión Soviética e Irán. La presente ley de atenuación es para sismos originados por fallas normales e inversas, en depósitos de roca y suelo firme profundo, M_w de 4 a 8 para distancias de hasta 100km. Las clasificaciones de sitio presentadas solo fueron dos, roca ($V_s > 750\text{m/s}$) y suelo firme profundo (profundidad con más de 20m con $V_s < 750\text{m/s}$) (Sadigh et al., 1997).

La ley de atenuación para la respuesta de aceleración espectral (5% amortiguamiento) para roca:

$$\ln(y) = C_1 + C_2M + C_3(8.5 - M)^{2.5} + C_4 \ln(R + e^{C_5+C_6M}) + C_7 \ln(R + 2) \quad \text{Ecuación 27}$$

La ley de atenuación para suelo:

$$\ln(y) = C_1 + M - 1.7 \ln(R + C_4 e^{C_5M}) + C_6 + C_7(8.5 - M)^{2.5} \quad \text{Ecuación 28}$$

5.5.5 Ecuación de Atenuación Chiou & Young (2014)

Ley de atenuación actualizada de la propuesta del 2008 para el cálculo de la aceleración máxima del suelo (PGA), velocidad máxima del suelo (PGV) y aceleraciones espectrales para un amortiguamiento de 5% para sismos continentales. La data NGA-West2 está comprendida principalmente por sismos California que fueron complementados con sismos de magnitud considerable en regiones tectónicas activas. Se puede emplear la distancia máxima mayor a 70Km, incluye el valor de Vs30 y la profundidad del estrato donde la velocidad de ondas de corte sea igual a 1Km/s (Chiou & Youngs , 2014).

La relación de atenuación de respuesta aceleración espectral para 5% amortiguamiento para roca:

$$\begin{aligned} \ln(y_{ij}) = & \ln(y_{refij}) + \eta_i + \phi_1 \min\left(\ln\left(\frac{V_{s30j}}{1130}\right), 0\right) \\ & + \phi_2 \left(e^{\phi_3(\min(V_{s30j}, 1130))} \right. \\ & \left. - e^{\phi_3(1130-360)} \right) \ln\left(\frac{y_{refij} e^{\eta_i \phi_4}}{\phi_4}\right) + \phi_5 \left(1 - e^{-\frac{\Delta Z_{1,0j}}{\phi_6}} \right) \\ & + \varepsilon_{ij} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 29}$$

5.5.6 Ecuación de Atenuación Abrahamson y Silva (2014)

Ley de atenuación para sismos corticales de regiones activas usando el catálogo de NGA-West2 (PEER). Aplicable a magnitudes 3.0 a 8.5 Mw con distancias de 0 a 300Km para periodos espectrales de 0 a 10 s. Considera los efectos no lineales para aceleraciones espectrales para los periodos de interés de PGA, diferentes distancias de atenuación y Vs30 para California, Japón, China y Taiwán. Mejora el escalamiento para el efecto HW (Hanging Wall), bloque de roca que descansa sobre una falla inclinada, empleando simulaciones numéricas. Al final la información considerara para la ley de atenuación tiene 15750 registros de 326 sismos (221 deslizamiento, 79 inversa y 29 normales). Se emplea para resultados

sismológicos y modelaciones numéricas geotécnicas. Los parámetros de entrada son los mismos que los utilizados por Abrahamson y Silva (2008). La roca es definida para valores de V_{s30} de 1180m/s, simplifica el modelo de desviación estándar entre la aceleración pico y aceleración espectral (Abrahamson et al., 2014).

El modelo de la ecuación de predicción de movimiento está dado por:

$$\begin{aligned} \ln(Sa(g)) = & f_1(M, R_{RUP}) + F_{RV}f_7(M) + F_Nf_8(M) + F_{As}f_{11}(CR_{JB}) \\ & + f_5(\widehat{S}a_{1180}, Vs_{30}) \\ & + F_{HW}f_4(R_{JB}, R_{RUP}, R_x, R_{y0}, W, dip, Z_{TOR}, M) \\ & + f_6(Z_{TOR}) + f_{10}(Z_1, Vs_{30}) + Regional(Vs_{30}, R_{RUP}) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 30}$$

5.5.7 Ecuación de Atenuación Campbell y Bozorgnia (2014)

Para la generación de la ley de atenuación se empleó la base de datos de PEER NGA-West2 para calcular el componente vertical PGA con un amortiguamiento lineal de 5 % para obtener la respuesta de aceleración espectral para periodos de 0.01 a 10 segundos. La nueva GMPE propuesta es para sismos continentales en regiones con tectónica activa para distancias de 0 a 300Km y un rango de magnitud de 3.3 a 8.5Mw. En total se consideraron 15521 eventos sísmicos de 322 sismos de $3 \leq M \leq 7.9$, de los cuales 7208 fuente cercana ($R_{RUP} \leq 80Km$) y 8313 fuente lejana ($80Km < R_{RUP} \leq 500Km$). Considerar eventos sísmicos de fuente lejana requiere la adición de atenuación anelástica, que depende de la regionalidad. Se actualizo la propuesta inicial del 2008, se ingresaron factores de modelo de pared, profundidad hipocentral y buzamiento de falla, atenuación geometría regional, atenuación anelástica, magnitud variable aleatoria y condiciones del sitio (Campbell & Bozorgnia, 2014).

La forma general de la ecuación de atenuación está dada por la expresión:

$$\ln(Y) = \begin{cases} \ln PGA \\ f_{mag} + f_{dist} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atn} \end{cases} \quad \text{Ecuación 31}$$

$PSA < PGA \ \& \ T < 0.25s$
otro

5.6 DETERMINACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO

El área de estudio fue cubierta con un enmallado de 25 puntos de evaluación: tomando como punto de partida para el enmallado las coordenadas de -77.075° y -11.98° . Se emplearon todas las fuentes sismogénicas para el análisis de peligro sísmico. El análisis empleado es realizado en la zona central del Perú (Lima) cuya tendencia de sismicidad es más notorio para profundidades intermedias para distancias de 450-800Km de la fosa marina. Se identifica el acoplamiento sísmico (acumulación de deformaciones) para profundidades entre 10-65Km (Guardia & Tavera, 2011).

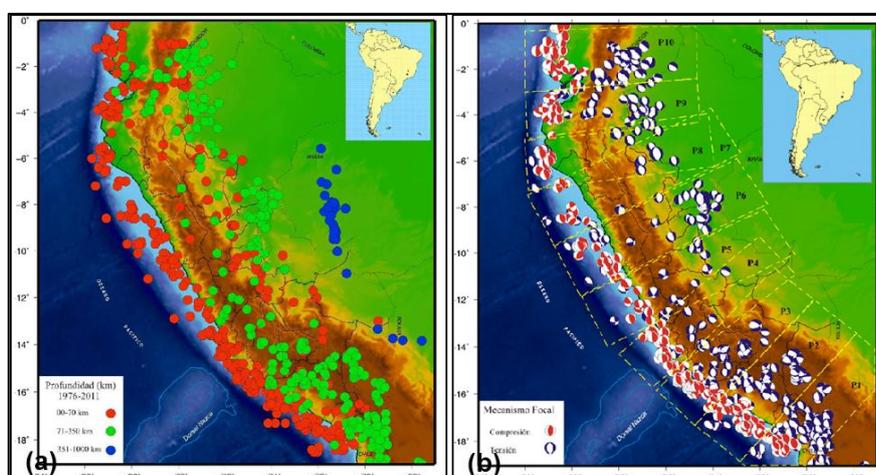


Figura N° 66: Mapa de Sismicidad de Datos CMT (1976-2011, $M \geq 5$), (a) Profundidad (b) Mecanismo Focal ($0 < h < 350$ Km). Tomado de Guardia y Tavera (2011)

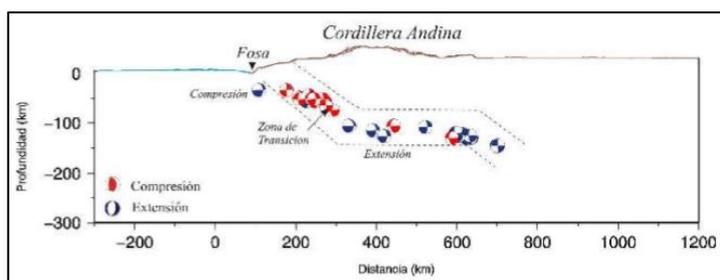


Figura N° 67: Sección Vertical correspondiente al área evaluada. Tomado de Guardia y Tavera (2011)

Se consideraron en los análisis las fuentes sismogénicas continentales una falla normal por presentarse de manera predominante en el rango de influencia para la zona de estudio.

Tabla N°32: Fallas Cuaternarias del Mapa Neotectónico del Perú. Tomado de INGEMMET (2009)

Código	Nombre de la estructura	Tipo de Estructura	Sentido del movimiento	Edad de último movimiento
PE-04	Falla Chalquibamba	Falla	Normal	Histórico (1937)
PE-05	Falla Shonita	Falla	Normal	Histórico (1937)
PE-06	Falla Tapiche	Falla	Inversa	<15 Ma
PE-07	Sistema de Fallas de la Cordillera Blanca	Falla	Normal	Histórico
PE-08	Falla Quiches	Falla	Normal	Histórico (1946)
PE-32	Falla Umayo	Falla	Inversa	<1.6 Ma

La ponderación empleada para las fuentes subducción para la generación del árbol lógico y la clasificación del suelo acorde a la IBC: B (roca). Por lo que para el análisis de Roca (B) se emplea $V_{s30}=767$ m/s². Las estaciones Acelerográficas del Distrito se encuentran en un suelo clasificado como tipo S1 (Norma Peruana E.030), C (ASCE) y C (IBC).

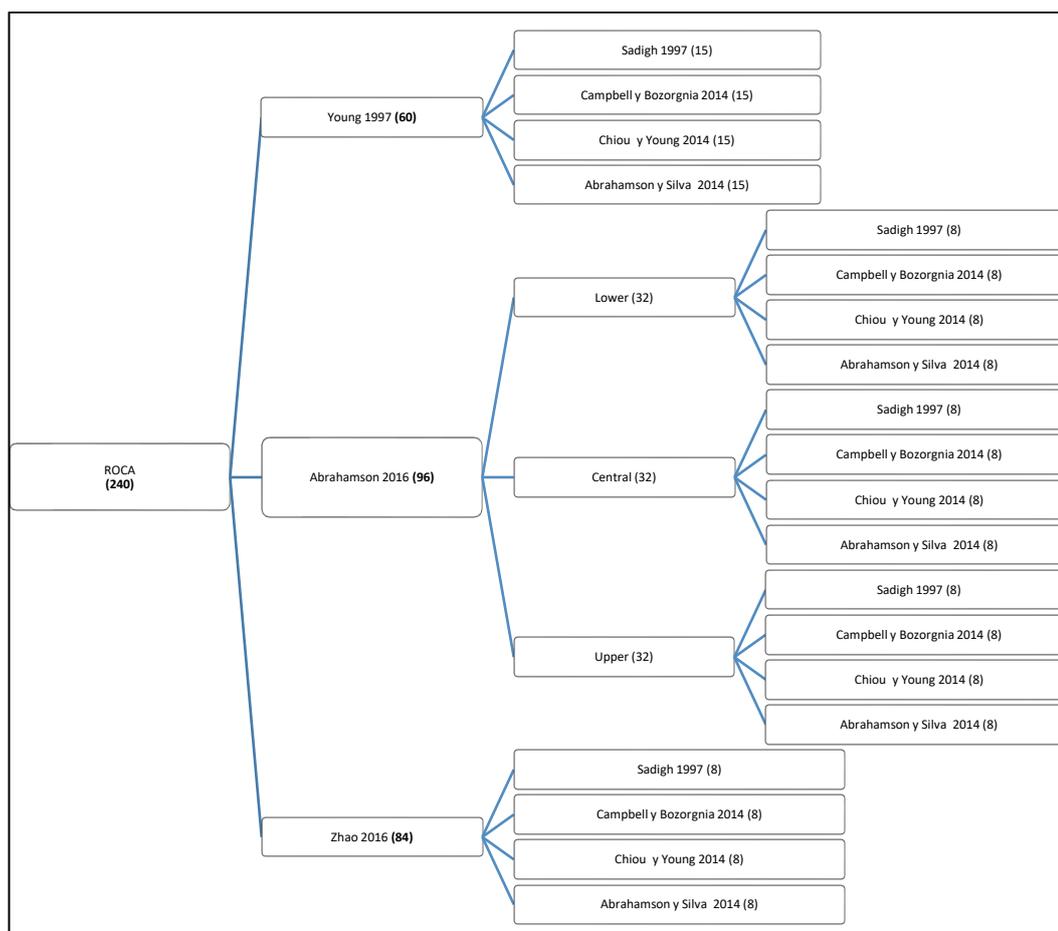


Figura N° 68: Esquema de los Árbol Lógico Empleado para Roca – Elaboración Propia.

La ley de atenuación de Zhao (2016) no se encuentra incorporado en el programa R-CRISIS se procedió a ingresar la ley de atenuación para Roca (B) ($T=PGA$ a

3.0s) para fuentes sismogénicas de Interfase que cubra el rango de profundidad de 0 a 75Km e Intraplaca una profundidad de 0Km a 180Km. La evaluación del árbol lógico fue evaluada por partes debido al rendimiento computacional que se tiene, se le asignaron los siguientes pesos para cada ramificación.

Tabla N°33: Clasificación del Perfil del Suelo (TABLA 20.3-1 SITE CLASSIFICATION ASCE/SEI 7-05). Tomado de IBC (2015)

Clas. del Sitio	Nombre de Suelo	Propiedades Promedio en los Primeros 30 metros			Comparativa Clasificación ASCE
		Velocidad Ondas de Corte, Vs (m/s)	Resistencia a la Penetración Estándar, N	Resistencia al corte no drenado, Su (psf)	
A	Roca muy dura	$V_s > 1500$	N/A	N/A	A
B	Roca	$760 < V_s \leq 1500$	N/A	N/A	B
C	Suelo muy denso o roca blanda	$360 < V_s \leq 760$	$N > 50$	$S_u \geq 2000$	C
D	Suelo rígido	$180 \leq V_s \leq 360$	$15 \leq N \leq 50$	$1000 \leq S_u \leq 2000$	D
E	Suelo blando	$V_s < 180$	$N < 15$	$S_u < 1000$	E
F	-	Cualquier perfil con más de 3 metros de suelo con las siguientes características: 1. Índice de Plasticidad $IP > 20$ 2. Contenido de humedad $w \geq 40\%$ 3. Resistencia al corte no drenado $S_u < 500$ psf Cualquier perfil conteniendo suelos con una o más de las siguientes características: 1. Suelos vulnerables a falla potencial o colapso bajo cargas sísmicas tal como suelos licuables, arcillas sensibles, suelos colapsables débilmente cementados. 2. Turbas y/o arcillas altamente orgánicas ($H > 3$ m. de turba y/o arcilla altamente orgánica, donde H = espesor del suelo) 3. Arcillas de muy alta plasticidad ($H > 7.5$ m con un índice de plasticidad $IP > 75$) 4. Arcillas blandas a medianamente rígidas muy potentes ($H > 36$ m)			F

El análisis de Peligro Sísmico en Roca para un periodo de retorno de 475 años muestra valores de PGA entre 508 a 517 cm/s^2 , se generó el Espectro de Peligro Uniforme para periodo de PGA hasta 3.0s. La desagregación sísmica permite identificar la combinación de magnitud y la distancia de la fuente a la zona de estudio que más contribuye al nivel de peligro sísmico generado. La

desagregación sísmica en el caso de Roca muestra mayor contribución para la magnitud de 6.5 y una distancia focal de 90 Km.

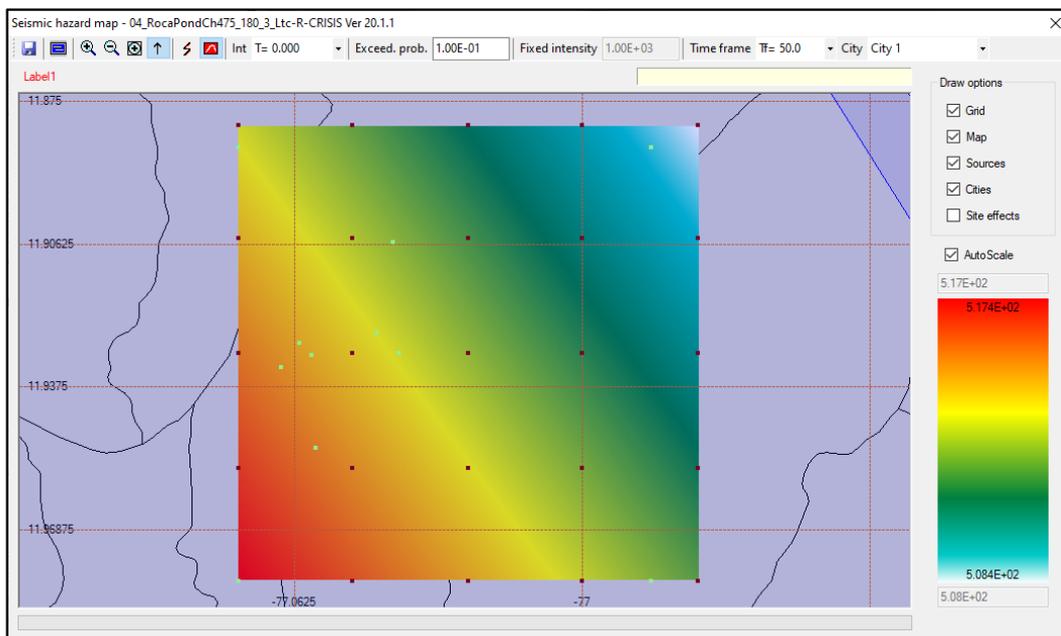


Figura N° 69: Mapa de Peligros Sísmico para Árbol Lógico para Roca para T=PGA 3.0s –
 Elaboración Propia (Software R-CRISIS).

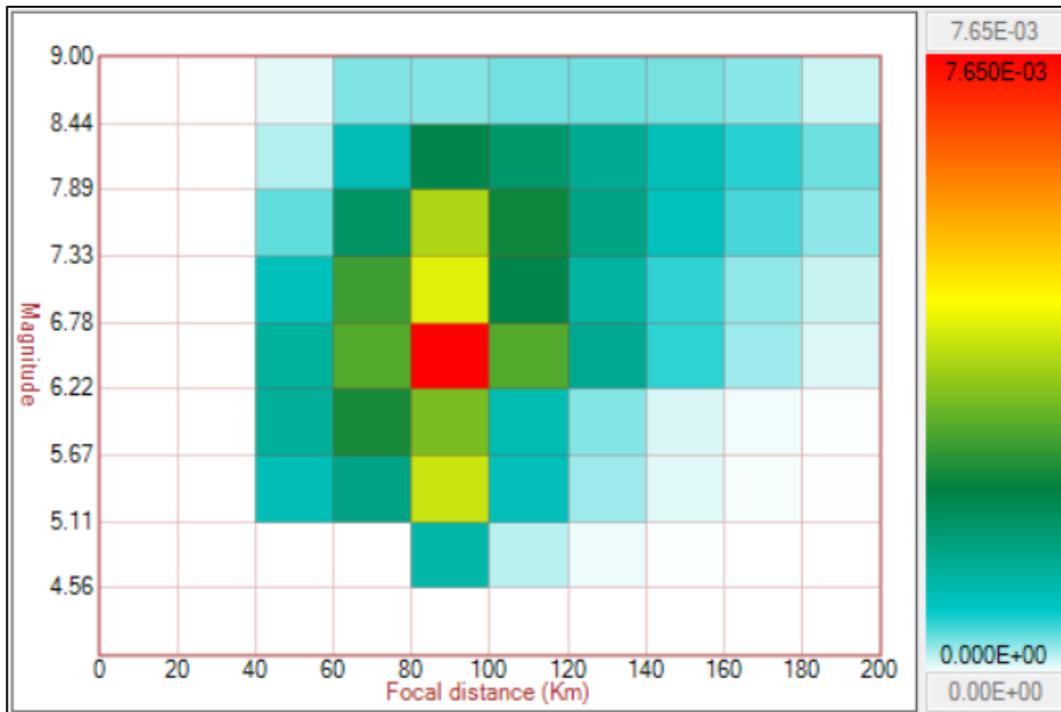


Figura N° 70: Desagregación Sísmica del Árbol Lógico para Roca de la coordenada -11.93° y -
 77.04°– Elaboración Propia (Software R-CRISIS).

5.7 ESPECTRO DE PELIGRO UNIFORME

El espectro de peligro uniforme es proporcionado por el cálculo de peligro sísmico probabilístico, nos permite tener las respuestas espectrales que tienen igual probabilidad de excedencia para un periodo dado; es la representación gráfica de las contribuciones de sismos del campo cercano y lejano de gran magnitud. Aunque presenta características conservadoras en cuanto al análisis de espectro de respuesta modal y no se recomienda emplear para la generación de movimientos artificiales del suelo. La respuesta para el diseño de estructuras es provista por este espectro (Gamarra, 2009).

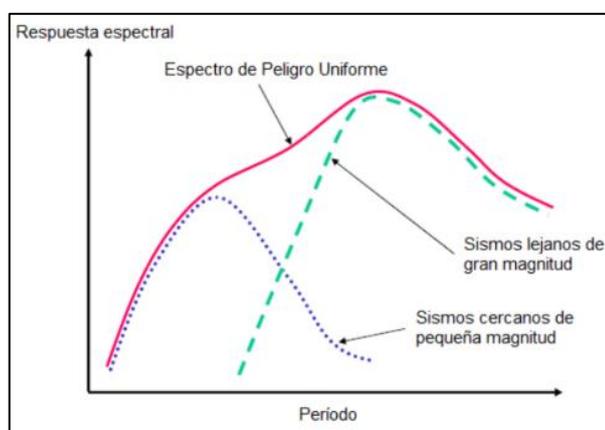


Figura N°71: Espectro de Peligro Uniforme como envolvente de la respuesta sísmica. Tomado de Gamarra (2009)

En los anexos se encuentran los Espectro de Peligro Uniforme (EPU) para los Arreglos Recopilados y Ejecutados para un Suelo Tipo B para un posterior análisis de sus resultados.

Los valores obtenidos de los EPU en los 7 puntos evaluados son muy próximos, en conclusión, es suficiente evaluar un punto para un distrito ya que no hay cambios significativos en el área de estudio.

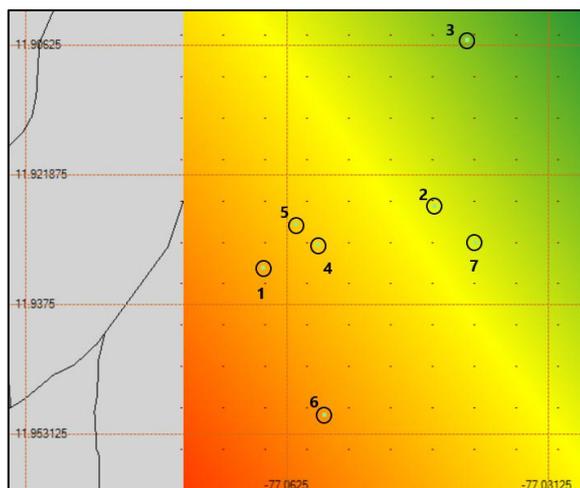


Figura N°72: Ubicación de los Espectros de Peligro Uniforme – Elaboración Propia.

5.7.1 EPU en Roca

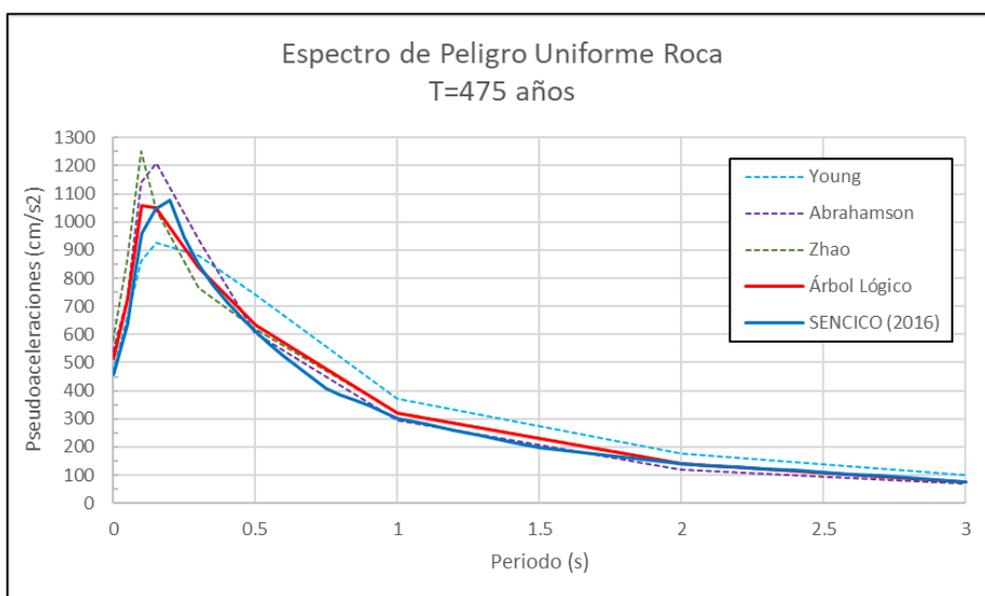


Figura N°73: Espectro de Peligro Uniforme Roca (B) de la coordenada N°7 (-11.93°, -77.04°)–
 Elaboración Propia.

Las curvas de peligro sísmico para Roca de la zona de estudio se generaron para los periodos espectrales de PGA-3.0s; considerando el 10% de excedencia en 50 años.

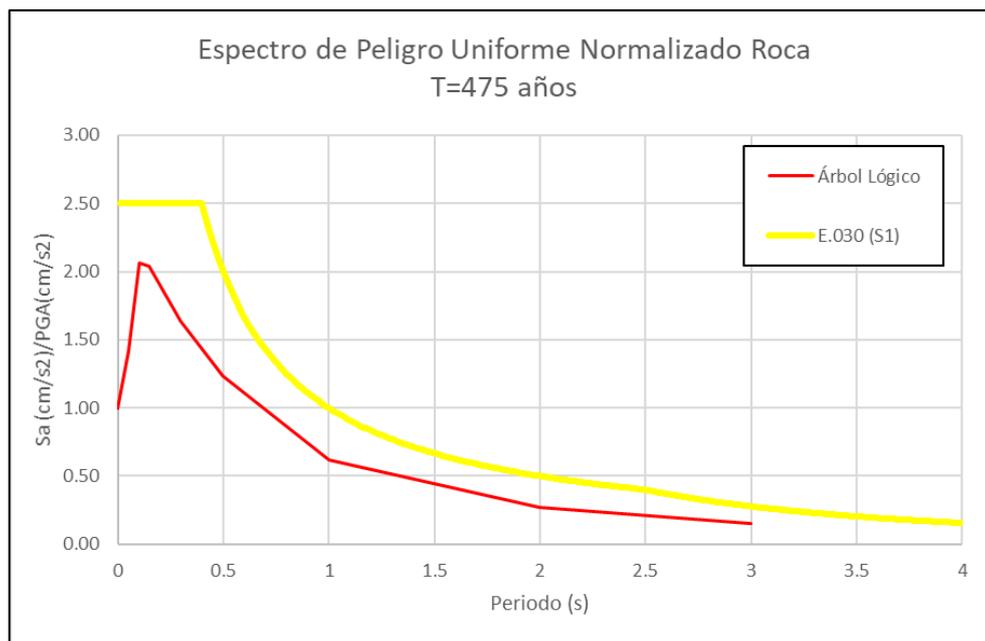


Figura N°74: Espectro de Peligro Uniforme Normalizado Roca de la coordenada N°7– Elaboración Propia.

5.8 ANALISIS DE RESULTADOS

Worden (2012) propuso relaciones probabilísticas para obtener relación entre los parámetros de movimientos de suelo, como los sismos de magnitud considerable con la escala de Mercalli Modificada. Utilizo en total 200000 observaciones de sismos en Canadá de la UGSS, el cual se tiene óptimos resultados para magnitudes mayores a 5. Propuso dos relaciones, la primera en función de la aceleración máxima del suelo (PGA) y la máxima velocidad del suelo. Dichas relaciones son las siguientes:

$$I_{PGA} = 1.78 + 1.55 \log(PGA), \log(PGA) \leq 1.57$$

Ecuación 32

$$I_{PGA} = -1.60 + 3.70 \log(PGA), \log(PGA) > 1.57$$

Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) establece niveles de aceleración máxima del suelo (PGA) para un 10% de probabilidad de excedencia de 50 años y un periodo de retorno de 475 años. Existe correlación entre la aceleración máxima del suelo y el nivel de peligro sísmico como se muestra a continuación (Giardini et al., 1999):

Tabla N°34: Peligro sísmico según la aceleración máxima del Suelo. Tomado de Giardini (1999)

Nivel de peligro sísmico	Aceleración máxima del suelo en fracción de g
Bajo	$0.00 < PGA \leq 0.08$
Medio o moderado	$0.08 < PGA \leq 0.24$
Alto	$0.24 < PGA \leq 0.40$
Muy alto	$0.40 < PGA$

El Peligro Sísmico Probabilístico se expresa en términos de tasas de excedencia o periodos de retorno de intensidades, las probabilidades de ocurrencia analizadas en la presente investigación fueron los siguientes:

Tabla N°35: Probabilidad de ocurrencia para un periodo de 50 años para un periodo de retorno (Tr) – Elaboración Propia.

Tr (años)	Probabilidad	Tr (años)	Probabilidad	Tr (años)	Probabilidad
30	0.8111	200	0.2212	950	0.0513
50	0.6321	400	0.1175	1000	0.0488
100	0.3935	475	0.0999	2500	0.0198

En función a las aceleraciones espectrales obtenidas para los suelos Tipo B, se empleó las correlaciones de Worden (2012) para calcular las intensidades en escala de Mercalli Modificada, también se le asignó el nivel de peligro.

Tabla N°36: Aceleraciones espectrales en Suelo Tipo B para diferentes periodos de retorno – Elaboración Propia.

Modelo de Atenuación	Aceleración horizontal Máxima de diferentes Modelos de atenuación para un período de retorno de:								
	30	50	100	200	400	475	950	1000	2500
Árbol Lógico (cm/s ²)	148	196	274	365	482	515	668	681	939
Árbol Lógico (g)	0.15	0.20	0.28	0.37	0.49	0.53	0.68	0.69	0.96
I _{PGA}	6.4	6.9	7.4	7.9	8.3	8.4	8.9	8.9	9.4
Nivel de PS	Medio o moderado	Medio o moderado	Alto	Alto	Muy alto				

La Estimación Probabilística del OBE (Operating Basic Earthquake) es el espectro de respuesta con 5% de amortiguamiento para un 10% de probabilidad de excedencia y 50 años de periodo de exposición para un periodo de retorno de 475 años, que es representado en el valor de PGA para un periodo T=0s.

La Estimación Probabilística del MCE (Maximun Considered Earthquake) es el espectro de respuesta con 5% de amortiguamiento para un 2% de probabilidad de excedencia y 50 años de periodo de exposición para un periodo de retorno de 2500 años, que es representado en el valor de PGA para un periodo $T=0s$.

De acuerdo a los valores obtenidos, la aceleración horizontal máxima correspondiente a OBE es de 0.53g (Suelo Tipo B), MCE es de 0.96g (Suelo Tipo B).

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de la aplicación del árbol lógico en el distrito de Comas, las fuentes sismogénicas de Subducción de Interfase e Intraplaca (Young 1997, Abrahamson 2016 y Zhao 2016), para la fuente sismogénicas Continental (Sadigh 1997, Campbell 2014, Chiou 2014 y Abrahamson 2014). Se realiza las comparaciones con los estudios pasados ejecutados en el Distrito de Comas (-11.93° , -77.04°).

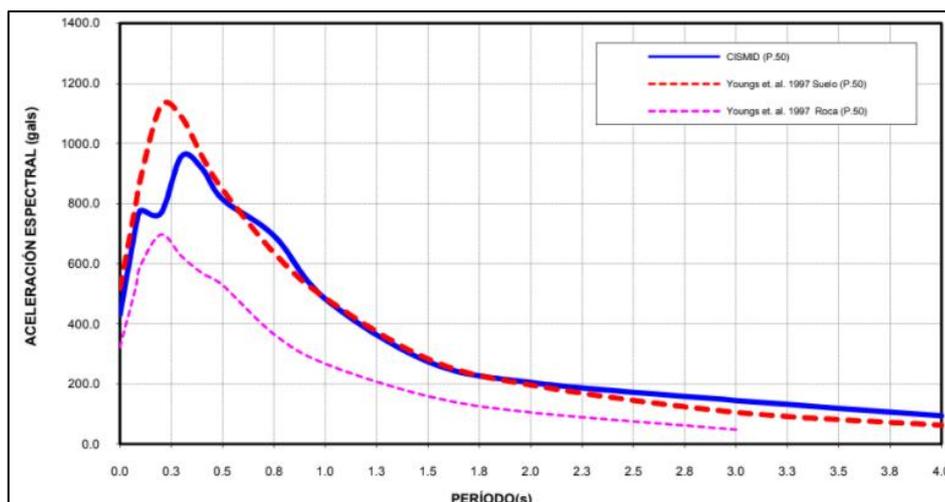


Figura N° 75: Espectro de Peligro Uniformes distrito de Comas. Tomado de CISMID (2011)

El cálculo del peligro sísmico se centra en el suelo tipo B para obtener el Espectro de Peligro Uniforme, el cual será empleado para el análisis de amplificación sísmica en el distrito de Comas. Para concluir, se muestra la comparación de resultados obtenidos con los valores obtenidos con estudios pasados (CISMID, 2011) y el resultado proporcionado por el aplicativo web de SENCICO para Suelo Tipo B clasificado acorde a la IBC (2015).

La N.T.E.030 de Diseño Sismorresistente de edificaciones brinda un factor de zona (Z) de 0.45 para la zona de estudio, el cual es obtenido con un 10% de probabilidad de excedencia y un periodo de exposición sísmica de 50 años, el cual

corresponde a un evento sísmico de 475 años de periodo de retorno. Comparando el valor obtenido PGA para Suelo Tipo B (roca) de 0.53 g (515 cm/s²), se logra verificar la veracidad de los datos obtenidos haciendo la comparación con estudios pasados teniendo menores valores de aceleraciones espectrales que SENCICO en caso de Roca.

Tabla N°37: Comparación de Aceleraciones espectrales obtenido para Suelo Tipo B para diferentes periodos de retorno– Elaboración Propia.

Entidad	Aceleración horizontal Máxima (cm/s ²) de diferentes Modelos de atenuación para un período de retorno de:								
	30	50	100	200	400	475	950	1000	2500
CISMID 2011	130	156	200	253	307	322	391	397	497
SENCICO	153	193	261	345	446	475	600	610	818
ÁRBOL LÓGICO	148	196	274	365	482	515	668	681	939

Además, se identificó un nivel de peligro sísmico muy alto debido a que presenta un $PGA > 0.40$ de acuerdo al GSHAP para un periodo de retorno de 475 años en Roca. Utilizando la correlación de Intensidades de Mercalli Modificada, para un Suelo Tipo B se sentirían Grado VIII (Destructivo), el cual ocasionaría daños leves en estructuras especializadas y daños considerables en estructuras bien construidas con posibilidad de derrumbes, fuertes daños en estructuras pobremente construidas y mampostería seriamente dañada o destruida.

Debido al área de extensión de la zona de estudio se puede considerar los valores obtenidos de peligro sísmico representativos debido a sus características: geológicas, geofísicas, geotécnicas y sismicidad. Comparando los resultados con estudios como CISMID 2011 y SENCICO 2016, se puede ver la importancia de tener sismos de magnitud considerable para la generación de las fuentes sismogénicas y la necesidad de la constante actualización del catálogo sísmico, se hace énfasis en la importancia de libre información de entidades como el IGP, SENCICO, Red Acelerográfica Posgrado FIC-UNI y CISMID-FIC-UNI, para brindar la información sísmica y pueda ser trabajado y desarrollado por las distintas entidades para beneficio de la sociedad.

CAPÍTULO VI: MICROZONIFICACIÓN Y AMPLIFICACIÓN SÍSMICA

6.1 INTRODUCCIÓN.

El análisis de amplificación sísmica es primordial para el diseño sísmico de estructuras, debido a que las condiciones geológicas y geotécnicas contribuyen en la amplificación de las ondas sísmicas durante un sismo generando el fenómeno de reflexión y refracción de las ondas. La amplificación sísmica se estima mediante los perfiles de ondas de corte del suelo, existe correlaciones entre los valores de velocidad de ondas de corte y el tipo de suelo, en el capítulo anterior se comentó sobre cómo se obtienen los perfiles de manera indirecta sin perforaciones generando incertidumbre en los resultados. Razón por la cual es necesario la presencia de una exploración directa para complementar y contrastar los resultados de los perfiles. Se realizó el análisis de amplificación sísmica en cada zona identificada con la microzonificación geotécnica para la delimitación del mapa de microzonificación sísmica.

6.2 ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS

En el distrito de Comas se encuentran 3 estaciones acelerográficas, solo las estaciones FEAL (solo se recopiló 3 registros sísmicos del IGP) y LIM019-BE1B se encuentran operativas en la actualidad. Se recopiló los registros sísmicos disponibles en las estaciones acelerográficas de Comas para evaluar los espectros de respuesta normalizado para un suelo S1 de acuerdo a la Norma E.30. Por lo que se realizó un análisis con los sismos registrados (magnitud mayor a 3.5) de los últimos años en el Perú, en los anexos se encuentra la relación de registros sísmicos considerados para el Análisis de Espectro de Peligro Uniforme Normalizado.

Tabla N°38: Estaciones Acelerográficas de Aceleraciones Espectrales obtenido para Suelo Tipo C para diferentes periodos de retorno (Tr) – Adaptado Red Acelerográfica

ESTACIÓN	INSTITUCION	LATITUDE (°)	LONGITUD (°)	NOMBRE
LIM019-BE1B	CISMID	-11.9485	-77.0598	Municipalidad de Comas
FEAL	IGP	-11.9166	-77.0403	Fe y Alegría
COIR	IGP	-11.9523	-77.0505	IE Carlos Wiese

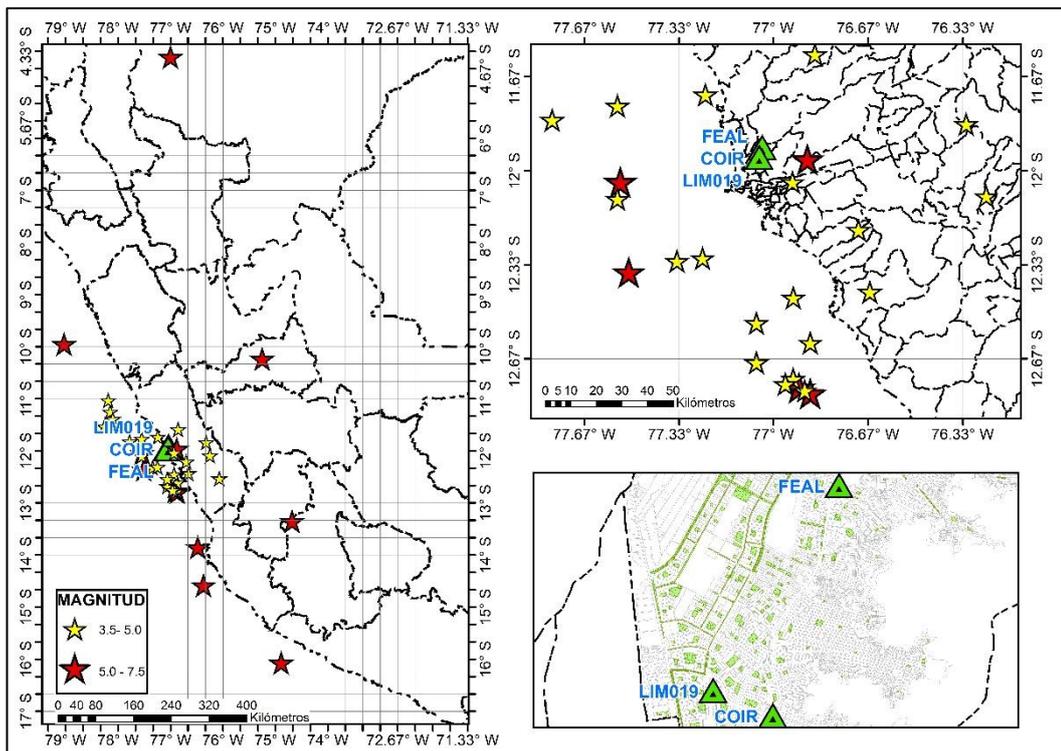


Figura N° 76: Mapa de Ubicación de los Sismos utilizados para el Análisis de EPU Normalizado –
 Elaboración Propia.

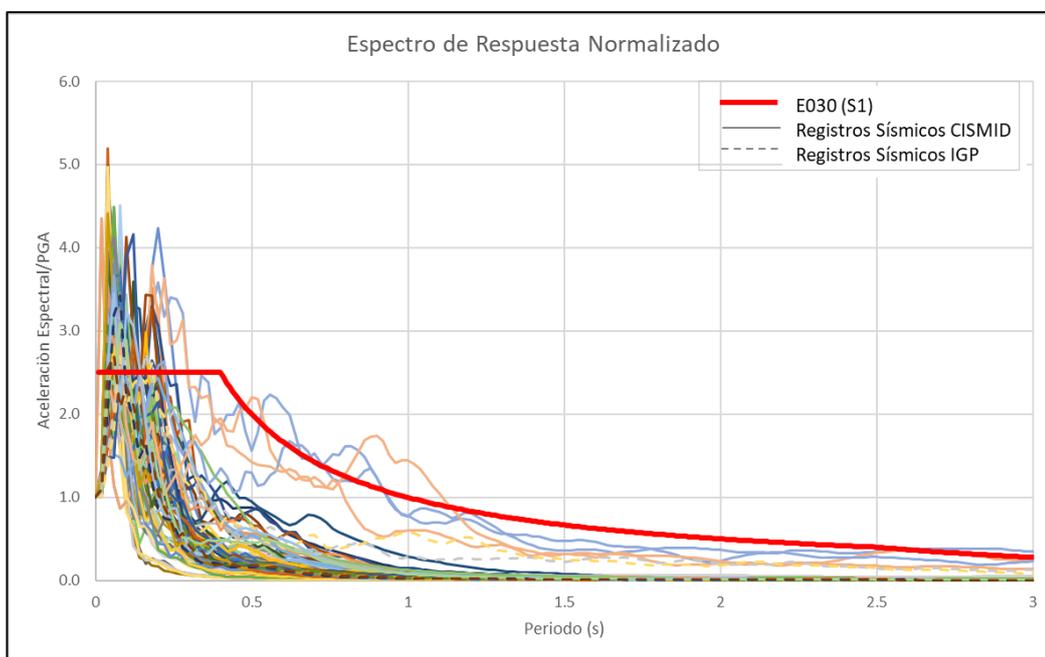


Figura N° 77: Espectro de Respuesta Normalizado de los sismos con $M > 3$ de las estaciones. –
 Elaboración Propia.

Se logra visualizar dos registros sísmicos no son envueltos por el Espectro de Peligro Uniforme Normalizado, esto se debe a que son eventos sísmicos

generados a grandes distancias (mayor a 400Km) cuyo fenómeno de reflexión y refracción genera mayores amplificaciones para periodos largos.

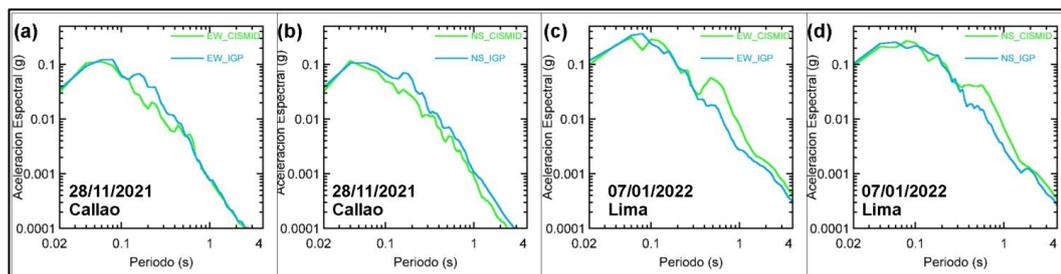


Figura N° 78: Espectro de Respuesta de registro sísmicos de las estaciones CISMID e IGP –
Elaboración Propia.

Se analizó los espectros de respuesta obtenidos de dos registros sísmicos ($6 > M > 5$) registrados por las estaciones acelerográficas del CISMID (LIM019) e IGP (FEAL). Se puede identificar la ubicación geográfica de las estaciones, donde la estación FEAL se encuentra en la zona baja de los cerros, la estación LIM019 en la zona sur y llana del distrito. Se aprecia las similitudes del desarrollo de los Espectros de Respuestas para las direcciones EW y NS, demostrando una rigidez similar en los lugares de registro. Además, se debe resaltar que para los resultados obtenidos en el sismo de Lima 07/01/2022 se identifica una amplificación en el caso de la estación CISMID en un rango de periodos de 0.45s. Se presume que se debe a la profundidad que fue originado el sismo, 116 Km a diferencia del sismo de Callao a 65Km.

6.3 AMPLIFICACIÓN SÍSMICA

6.3.1 Registros Sísmicos Empleados

El Perú tiene evidencia histórica que desde el año 1513 se produjeron eventos sísmicos de gran magnitud (Silgado, 1978) siendo tal vez las más reciente la ocurrida en la ciudad de Pisco en el 2007, lo cual evidencia un silencio sísmico de aproximadamente 15 años. Se implementó la instalación de acelerógrafos a partir de los años 60, en la actualidad existen diversas instituciones que poseen redes acelerográficas en el Perú. Dicha instrumentación nos permite recopilar información para la interpretación del conocimiento dinámico. Los sismos considerados para el análisis de amplificación sísmica son 1966 (Lima), 1974 (Lima), 2001 (Moquegua) y 2010 (Chile). Se emplearon 5 registro tiempo-historia de sismos significativos registrados en estaciones acelerográficas clasificados

como Suelo Tipo C-IBC. El sismo de 1966 fue uno de los primeros registrados y el de 1974 es conocido como uno de los más importantes. Los sismos 2001 y 2010 pertenecen a la historia sísmica más reciente.

Tabla N°39: Sismos Magnitud Significativa empleado para el Análisis de Amplificación Sísmica –
Elaboración Propia.

Fecha		17/10/1966	3/10/1974	3/10/1974	23/06/2001	27/02/2010
ESTACIÓN	Nombre de la Estación	Parque de la Reserva	Parque de la Reserva	Estación Surco	Cesar Vizcarra Vargas	Universidad de Chile - RENADIC
	Clave de la Estación	PRQ	PRQ	SURCO	MOQ1	SANTIAGO PUENTE ALTO QDR
	Localización de la Estación	Parque de la Reserva, Cercado de Lima, Lima	Parque de la Reserva, Cercado de Lima, Lima	Casa del Dr. Huaco	Complejo Deportivo del Gobierno Regional de Moquegua	Maule, Chile
	Frecuencia (Hz)	50	50	50	100	100
	Latitud (°)	-12.07	-12.07	-12.13	-17.19	-33.5
	Longitud (°)	-77.04	-77.04	-76.98	-70.93	-70.5
	Institución	CISMID-UNI	CISMID-UNI	CISMID-UNI	CISMID-UNI	RENADIC
	V_{s30} (m/s)	619 ¹	619 ¹	575 ²	573 ³	480 ⁴
Clasificación IBC (RNE030 (2019))	C (S1)	C (S1)	C (S1)	C (S1)	C (S2)	
SISMO	Latitud (°) Sismo	-10.7	-12.5	-12.5	-16.08	-36.29
	Longitud (°) Sismo	-78.7	-77.98	-77.98	-73.77	-73.24
	Magnitud	8.1Mw	6.6 mb	6.6 mb	6.9 mb 8.3Mw	8.8 Mw
	Unidades	cm/s2	cm/s2	cm/s2	Gal (cm/s2)	cm/s2

¹GEOINSTRUMENTS (2017). Servicio de Consultoría para la determinación del comportamiento Dinámico del suelo en función de la velocidad de propagación de ondas. SENCICO.

²CISMID-FIC-UNI (2021). Fusión de Algoritmos de Machine Learning y Tecnologías de Observación de la Tierra para la Mitigación de Desastres

³Charca, O. (2018). Selección de Leyes de Atenuación Sísmica de Subducción para la Evaluación del Peligro Sísmico en el Perú.

⁴Godoy, C. (2015). Importancia de la velocidad de onda de corte y del período predominante para la evaluación de la respuesta de sitio en Santiago.

6.3.2 Acelerogramas Sintéticos

Debido a que los registros sísmicos instrumentales y analógicos poseen errores, en necesario corregirlos antes de realizar cualquier análisis. Los registros sísmicos empleados fueron corregidos de acuerdo a lo recomendado por Converse y Brady

(1992): adicionar 0 al inicio y al final del registro en el dominio del tiempo, se realizó una corrección por línea base-cuadrática (error instrumental) y pasabanda Butterworth de 0.30-25Hz de orden 4 para eliminar frecuencias indeseadas. Los registros sísmicos corregidos fueron generados empleando el programa SeismoSignal en acelerogramas analógicos y digitales. Se muestran los parámetros principales obtenidos del tratamiento de los registros. El desplazamiento máximo identificados de los sismos de gran magnitud no son superiores a 5 cm.

Tabla N°40: Parámetros de Registros Sísmicos Corregidos – Elaboración Propia.

Parámetros	1966		1974 PQR		1974 SURCO		2001		2010	
	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS
Máxima Aceleración (cm/s ²)	174	258	178	155	208	232	271	256	307	270
Tiempo de Máxima Aceleración (s)	31	30	20	28	29	36	54	58	83	83
Máxima Velocidad (cm/s)	11	12	14	10	16	16	25	23	26	23
Tiempo de Máx. Velocidad (s)	30	30	28	28	35	36	53	53	83	81
Máximo Desplazamiento (cm)	1	3	2	1	3	2	4	5	4	4
Tiempo de Máximo Desplazamiento (s)	33	33	30	23	29	36	57	54	83	81
Periodo Predominante (s)	0.08	0.10	0.12	0.30	0.14	0.18	0.18	0.66	0.34	0.28

Tabla N°41: Parámetros de Registros Sísmicos Sintéticos – Elaboración Propia.

Parámetros	1966		1974 PQR		1974 SURCO		2001		2010	
	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS
Escalamiento Espectral	1	1	1.6	3.5	2.2	2.3	3.5	3.5	1.5	3
Ajuste Espectral	0.02 - 1.0	0.02 - 1.0	0.02 - 0.3	0.02 - 1.0	0.02 - 0.6	0.02 - 0.25	0.02 - 1.0	0.02 - 1.0	0.02 - 0.5	0.02 - 3
Escalamiento Espectral	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ajuste Espectral	0.8 - 3.0	0.5 - 3.0	0.8 - 3.5	0.8 - 3.0	0.5 - 3.0	0.02 - 3.0	0.02 - 3.0	0.5 - 3.0	0.4 - 3.0	0.5 - 1.0
Máxima Aceleración (cm/s ²)	442	441	456	444	440	437	450	505	483	476
Máxima Velocidad (cm/s)	24	26	31	33	30	27	29	27	34	29
Máximo Desplazamiento (cm)	5	6	5	5	6	6	6	6	6	8
Periodo Predominante (s)	0.10	0.10	0.10	0.14	0.10	0.08	0.12	0.12	0.14	0.18

Finalmente, se procede a realizar el escalamiento y ajuste espectral con los registros sísmicos corregidos empleando el programa SeismoMatch, se adjunta una tabla resumen de los parámetros obtenidos de los sismos sintéticos. Para realizar el escalamiento y ajuste espectral se empleó el Espectro de Peligro

Uniforme para un periodo de retorno de 475 años calculado en el CAPÍTULO I:1.1.1. y un amortiguamiento viscoso del suelo del 5%, se puede visualizar el ajuste y escalamiento del EPU's resultantes.

Luego de realizar el tratamiento de los registros ocurrirá cambios en las series de aceleraciones, Amplitudes de Fourier, espectros HVSR, de igual manera los espectros respuesta y espectro de respuesta normalizado.

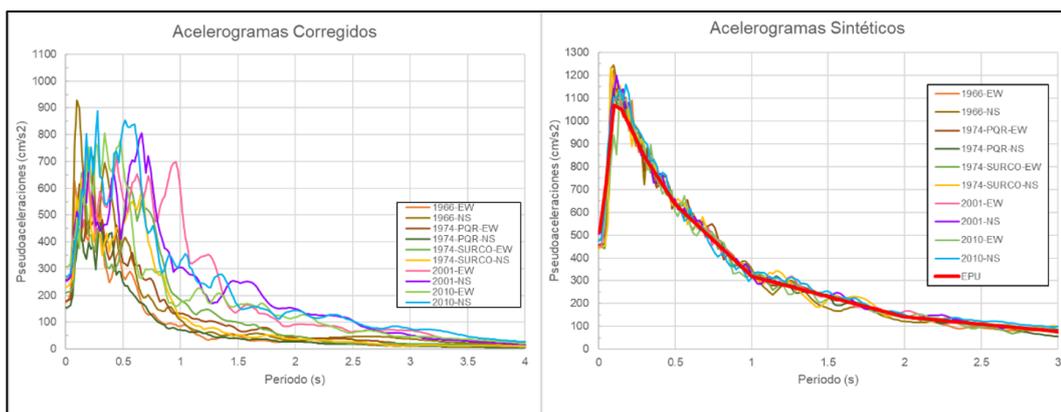


Figura N° 79: Espectro de Respuesta de los Acelerogramas Corregidos y Sintéticos– Elaboración Propia.

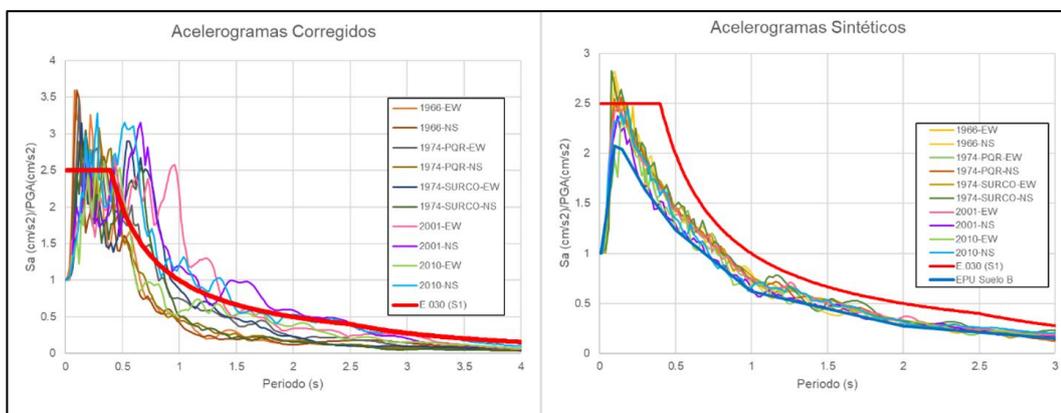


Figura N° 80: Espectro de Respuesta Normalizado de los Acelerogramas Corregidos y Sintéticos– Elaboración Propia.

6.3.3 Análisis de Respuesta de Sitio Unidimensional

Para el cálculo de la amplificación sísmica es importante la estimación de los perfiles de velocidad de onda de corte descritos en el CAPÍTULO IV:4.5 , los cuales permiten identificar las características dinámicas del depósito del suelo. La caracterización geotécnica descrita en el CAPÍTULO I:1.1 permitió la selección de las curvas de degradación del módulo de corte y amortiguamiento, en base a las

exploraciones recopiladas. De dicha manera se logrará obtener resultados confiables de la respuesta sísmica a distintas sollicitaciones del suelo.

De la información disponible, se seleccionó los perfiles de gran profundidad hasta Suelo Tipo B-IBC para la evaluación de la amplificación sísmica. Se empleó el programa DEEPSOIL v7.0 para un modelo unidimensional empleando el análisis lineal equivalente para los acelerogramas sintéticos obtenidos anteriormente. El espesor de los estratos de suelo empleado en el modelamiento fue generado tomando en consideración la frecuencia de vibración que debe ser mayor o igual a 25Hz (4H/V). Para el análisis lineal equivalente del perfil del suelo se empleó el modelo MKZ.

La ubicación espacial de los perfiles A-01, A-02 y A-03 en el distrito, se presentaron en el CAPÍTULO V.

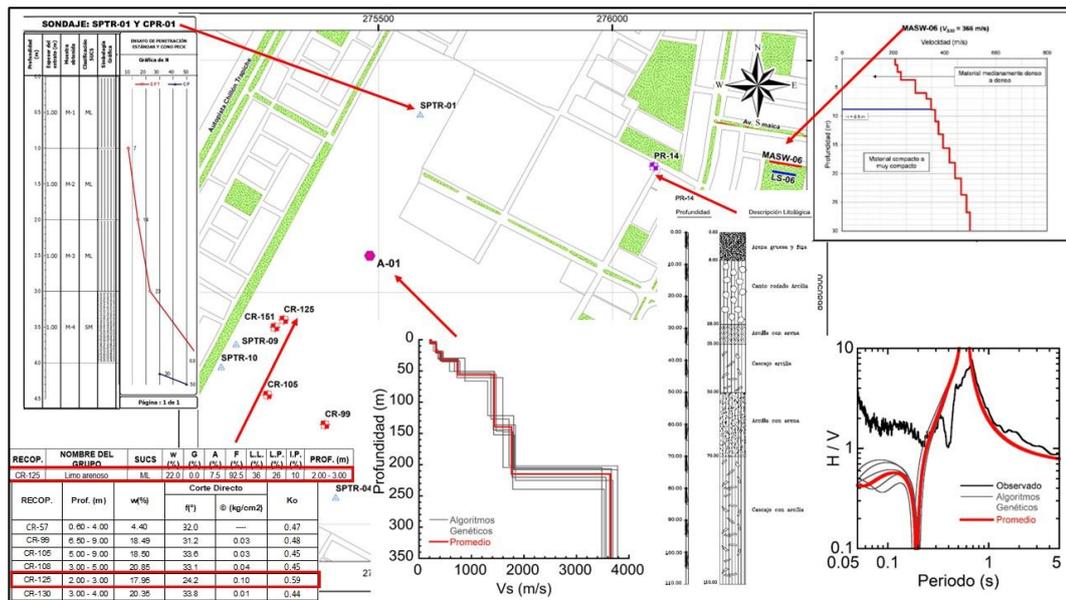


Figura N° 81: Ensayos Geotécnicos y Geofísicos alrededor del Arreglo A-01– Elaboración Propia.

Se muestra los estudios empleados para caracterizar el perfil del suelo del A-01. Para caracterizar los primeros 5 m de profundidad se empleó la información del SPTR-01 (4 m de Limo Arenoso) y la calicata C-125 indica un I.P. (%) =10. El Limo Arenoso posee los siguientes valores: LL=36, LP=26 e IP=10, la presencia de coloides (arcilla) es mínima por lo que se empleara la formula Ecuación 18 para el cálculo del Ko. Para profundidades de hasta 33m de profundidad se tomó como referencia el pozo PR-14 (presencia de cascajo, arcilla y grava). El último estrato

del perfil se consideró un comportamiento elástico por estar próximo al basamento Rocoso (Suelo Tipo B-IBC).

Tabla N°42: Propiedades consideradas para en análisis de amplificación sísmica -A1– Elaboración Propia.

Layers	Esp. (m)	Prof. (m)	γ (KN/m ³)	Vs (m/s)	Frec. (Hz)	Modelo	Tipo de Suelo	Consideraciones
1	1.59	1.59	17.69	221	35	Zhang (2005)	Limo Arenoso	IP=10, Ko=0.59, Yr1(%)=0.0859, α =0.855, k=0.274, Dmin=0.9
2	1.59	3.18	17.69	221	35			
3	1.59	4.77	17.69	221	35			
4	2.41	7.19	18.08	320	33	Menq (2003)	Grava	Cu=20, Ko=0.45, N=10, D50(mm)=19
5	2.41	9.60	18.08	320	33		Grava	
6	2.41	12.02	18.08	320	33		Grava	
7	2.41	14.43	18.08	320	33		Grava	
8	2.41	16.85	18.08	320	33		Grava	
9	2.41	19.26	18.08	320	33		Grava	Cu=20, Ko=0.36, N=10, D50(mm)=19
10	3.43	22.69	18.45	415	30		Grava	
11	3.43	26.12	18.45	415	30		Grava	
12	3.43	29.56	18.45	415	30		Grava	
13	3.43	32.99	18.45	415	30		Grava	
14	5.81	38.80	19.64	732	31		Elástico	
15	5.81	44.61	19.64	732	31			
16	5.81	50.42	19.64	732	31			
17	5.81	56.23	19.64	732	31			
Bedrock			21.93	1433				

Se muestra los estudios empleados para caracterizar el perfil del suelo del A-02. Para caracterizar los primeros 3 m de profundidad se empleó la información del CR-89 (Limo Arenoso) indica un I.P. (%) =12, con la CR-03 se identifica hasta los 4.7m de profundidad la presencia de arcilla limosa. El Limo Arenoso posee los siguientes valores: LL=37, LP=25 e IP=12, la presencia de coloides (arcilla) es mínima por lo que se empleara la formula Ecuación 18 para el cálculo del Ko. Para profundidades de hasta 25m de profundidad se tomó como referencia el pozo PR-03 (presencia de cantos rodados, arcilla arenosa, arcilla compacta y grava). El último estrato del perfil se consideró un comportamiento elástico ($V_s \geq 760$). Todas estas consideraciones fueron empleadas para la Tabla N°43: Propiedades del perfil profundo-A2.

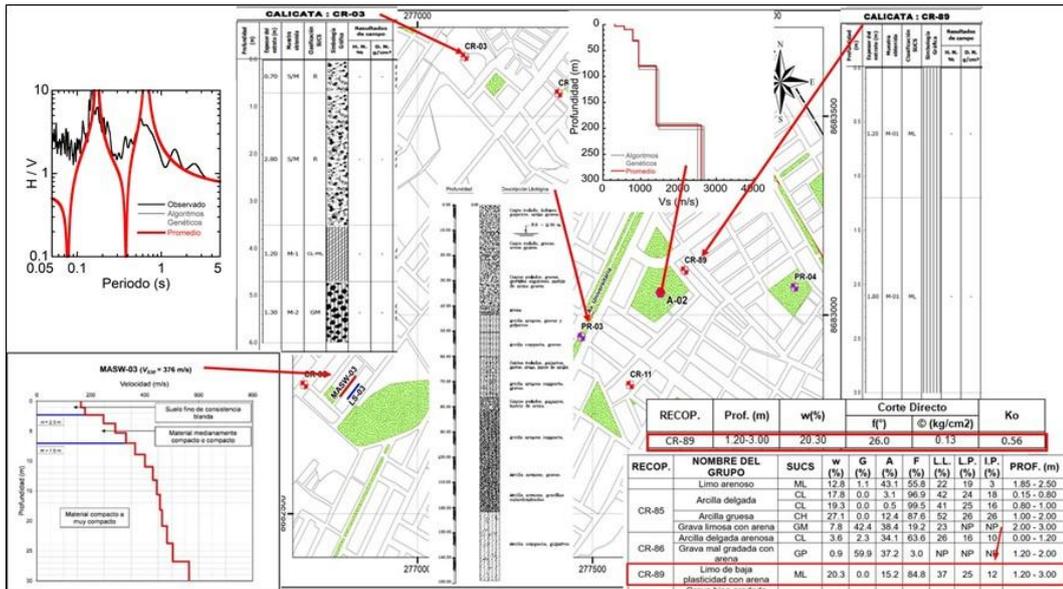


Figura N° 82: Ensayos Geotécnicos y Geofísicos alrededor del Arreglo A-02– Elaboración Propia.

Tabla N°43: Propiedades consideradas para en análisis de amplificación sísmica -A2– Elaboración Propia.

Layers	Esp. (m)	Prof. (m)	γ (KN/m3)	Vs (m/s)	Frec. (Hz)	Modelo	Tipo de Suelo	Consideraciones
1	0.95	0.95	17.30	126	33	Zhang (2005)	Limo arenoso	IP=12, Ko=0.56, Yr1(%)=0.0881, α=0.8592, k=0.2665, Dmin=0.916
2	0.95	1.90	17.30	126	33		Limo arenoso	
3	0.95	2.85	17.30	126	33		Limo arenoso	
4	0.95	3.81	17.30	126	33		Limo arenoso	
5	0.95	4.76	17.30	126	33		Limo arenoso	
6	3.24	7.99	18.55	439	34	Menq (2003)	Grava	Cu=20, Ko=0.36, N=10, D50(mm)=19
7	4.26	12.25	19.31	641	38		Grava	
8	4.26	16.51	19.31	641	38		Grava	
9	4.26	20.77	19.31	641	38		Grava	
10	4.26	25.03	19.31	641	38		Grava	
11	6.34	31.37	19.79	775	31	MKZ		
12	6.34	37.71	19.79	775	31			
13	6.34	44.06	19.79	775	31			
14	6.34	50.40	19.79	775	31			
15	6.34	56.74	19.79	775	31			
16	6.34	63.08	19.79	775	31			
17	6.34	69.43	19.79	775	31			
18	6.34	75.77	19.79	775	31			
19	6.34	82.11	19.79	775	31			
20	6.34	88.46	19.79	775	31			
21	6.34	94.80	19.79	775	31			

Layers	Esp. (m)	Prof. (m)	γ (KN/m ³)	Vs (m/s)	Frec. (Hz)	Modelo	Tipo de Suelo	Consideraciones
22	6.34	101.14	19.79	775	31			
23	6.34	107.48	19.79	775	31			
24	6.34	113.83	19.79	775	31			
25	6.34	120.17	19.79	775	31			
Bedrock			21.23	1204.20				

Se muestra los estudios empleados para caracterizar el perfil del suelo del A-03. Para caracterizar los primeros 3 m de profundidad se empleó la información del CR-86 (Arcilla arenosa) indica un I.P. (%) =10, con el pozo PR-21 se identifica hasta los 9m de profundidad la presencia de grava. La Arcilla Arenosa posee los siguientes valores: LL=26, LP=16 e IP=10, la presencia de coloides (arcilla) es considerable por lo que se empleara la formula Ecuación 19 para el cálculo del Ko. El último estrado del perfil del arreglo se consideró un comportamiento elástico por estar próximo al basamento Rocoso (Suelo Tipo B-IBC). Todas estas consideraciones fueron empleadas para la Tabla N°44: Propiedades del perfil profundo-A3.

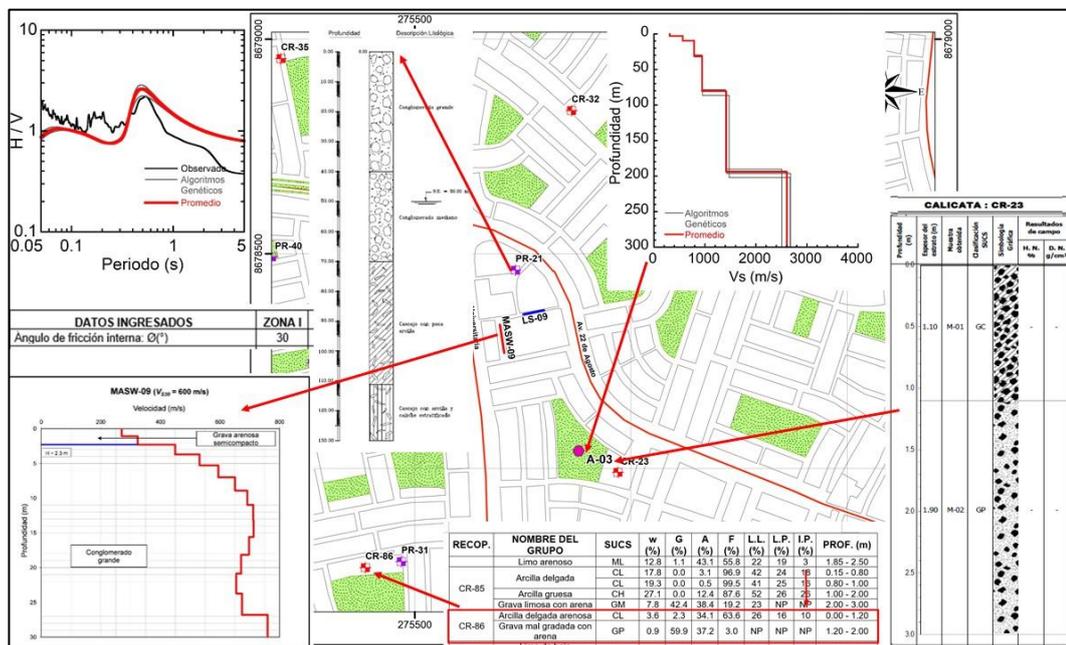


Figura N° 83: Ensayos Geotécnicos y Geofísicos alrededor del Arreglo A-03– Elaboración Propia.

Tabla N°44: Propiedades consideradas para en análisis de amplificación sísmica -A3– Elaboración Propia.

Layers	Esp. (m)	Prof. (m)	γ (KN/m ³)	Vs (m/s)	Frec. (Hz)	Modelo	Tipo de Suelo	Consideraciones			
1	1.48	1.48	18.05	311	53	Zhang (2005)	Arcilla arenosa	IP=10, Ko=0.48, Yr1(%) =0.0859, α =0.855, k=0.274, Dmin=0.9			
2	1.48	2.96	18.05	311	53						
3	3.24	6.19	19.02	564	44	Menq (2003)	Grava	Cu=20, Ko=0.36, N=10, D50(mm)=19			
4	3.24	9.43	19.02	564	44						
5	5.44	14.86	19.84	789	36	MKZ					
6	5.44	20.30	19.84	789	36						
7	5.44	25.74	19.84	789	36						
8	5.44	31.17	19.84	789	36						
9	7.06	38.23	20.38	946	33						
10	7.06	45.30	20.38	946	33						
11	7.06	52.36	20.38	946	33						
12	7.06	59.42	20.38	946	33						
13	7.06	66.48	20.38	946	33						
14	7.06	73.54	20.38	946	33						
15	7.06	80.60	20.38	946	33						
Bedrock			21.89	1419							

La Función de Transferencia nos permite identificar características importantes de la respuesta del suelo dado que describe la relación de amplitudes de la superficie del suelo y la roca. Se muestra la Función de Transferencia de cada perfil profundo de suelo explorado por los Arreglos de Microtremores para profundidades variables (Layers o capas) y el ensayo MASW más cercano.

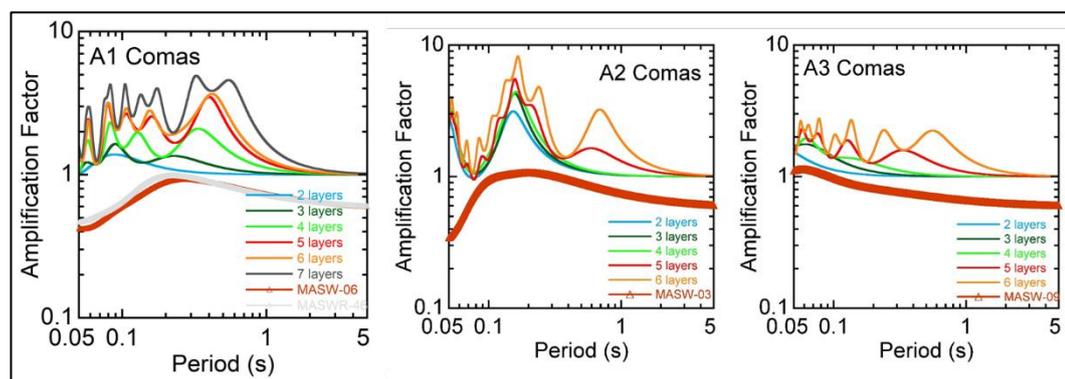


Figura N° 84: Función de Transferencia de los Perfiles de Suelo Profundo– Elaboración Propia.

El Arreglo A1 (A-01) se encuentra a 920 m de distancia del ensayo MASW-06 y 80 m de MASWR-46, se puede identificar que existe coherencia entre los ensayos realizados hasta los 20 m de profundidad.

Tabla N°45: Parámetros obtenido de la Función de Transferencia-A1– Elaboración Propia.

Capas	Velocidad de ondas de corte (m/s)	Profundidad (m)
1	220	4.8
2	320	19.3
3	415	33
4	732	56.2
5	1433	139.3
6	1762	215
7	3643	-

El Arreglo A2 (A-02) se encuentra a 920 m de distancia del ensayo MASW-03, se puede identificar que existe coherencia entre los ensayos realizados hasta los 25 m de profundidad.

Tabla N°46: Parámetros obtenido de la Función de Transferencia-A2– Elaboración Propia.

Capas	Velocidad de ondas de corte (m/s)	Profundidad (m)
1	126	4.8
2	439	8
3	641	25
4	775	120.1
5	1204	156.7
6	2606	-

El Arreglo A3 (A-03) se encuentra a 300 m de distancia del ensayo MASW-09, se puede identificar que existe coherencia entre los ensayos realizados hasta los 31 m de profundidad.

Tabla N°47: Parámetros obtenido de la Función de Transferencia-A3– Elaboración Propia.

Capas	Velocidad de ondas de corte (m/s)	Profundidad (m)
1	311	3
2	564	9.5
3	789	31.2
4	946	80.6
5	1419	194.1
6	2610	-

6.3.4 Espectro de Respuesta Superficie

Los Espectros de Respuesta en Superficie son producto de la amplificación de la aceleración ocurrido en el perfil del suelo. El espectro de respuesta que pertenece al Arreglo A-01 presenta una forma de valle teniendo periodos de 0.16 a 0.82 s con pseudoceleración de 1.0 a 1.3g y el Arreglo A-03 cuenta periodos de 0.08 a 0.14 s con pseudoceleración de 1.70 a 2.8g.

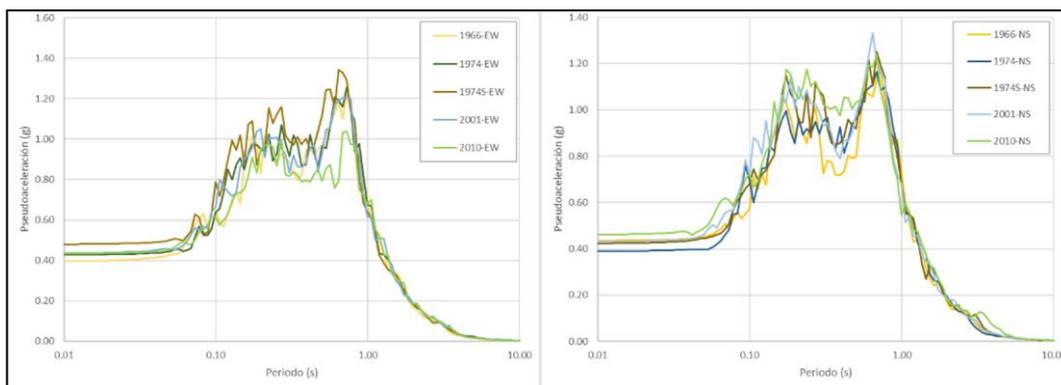


Figura N° 85: Amplificación de las Pseudoceleraciones de respuesta para distintos sismos– A1–
 Elaboración Propia.

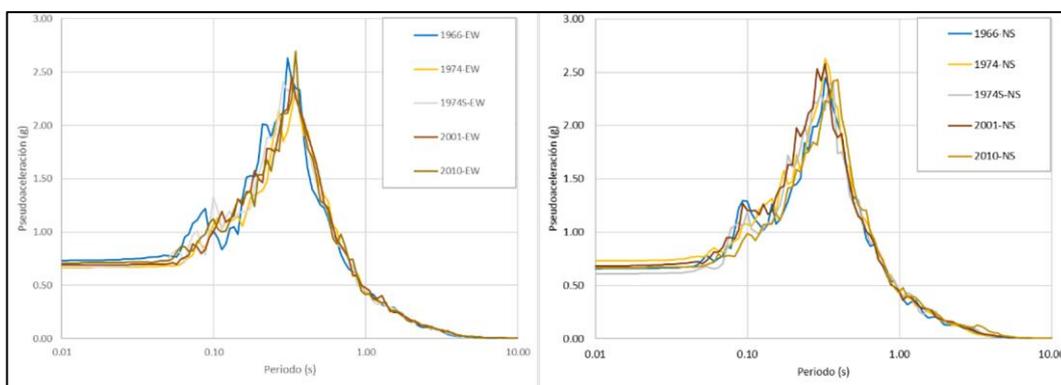


Figura N° 86: Amplificación de las Pseudoceleraciones de respuesta para distintos sismos– A2–
 Elaboración Propia.

A diferencia del Arreglo A-02, en donde predomina el periodo 0.29 a 0.39s con pseudoceleración de 2.2 a 2.7g.

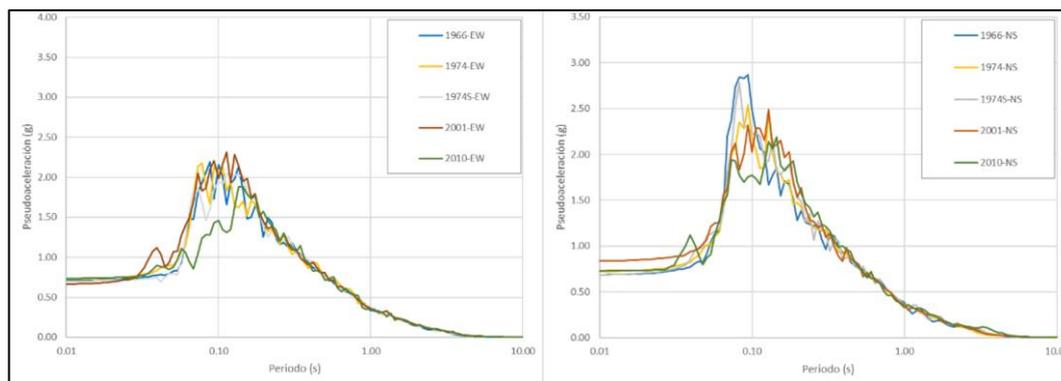


Figura N° 87: Amplificación de las Pseudoaceleraciones de respuesta para distintos sismos– A3–
Elaboración Propia.

En los anexos se encuentra los Espectros de Respuesta para diferentes profundidades de los perfiles A-01, A-02 y A-03, respectivamente. Nos permitirá visualizar el desarrollo de las amplificaciones del suelo conforme el registro sísmico asciende a la superficie por cada estrato discretizado. En los anexos se encuentra los Espectros de Respuesta para cada estrato que compone los perfiles profundos (A-01, A-02 y A-03). En los anexos se encuentra los Espectros de Respuesta en la Superficie y en el Basamento Rocoso, el cual es obtenido de un análisis de un medio elástico dado que los registros sísmicos fueron registrados en una superficie rígida. Se identificó la máxima amplificación del suelo producto del Análisis de Amplificación comparando la respuesta del estrato más profundo con la respuesta a nivel superficial de los perfiles. En todos los análisis realizados se identifica una amplificación, en donde predomina mayores PGA generada por el sismo de Maule (2010-EW).

6.3.5 Perfil de aceleraciones, deformaciones y desplazamientos

Los perfiles de aceleraciones, deformaciones y desplazamientos nos permitirán visualizar la variación del comportamiento dinámico del suelo en función a la profundidad del análisis en un perfil unidimensional.

El perfil del Arreglo A-01 presenta una máxima deformación a una profundidad de 18m con deformación de 0.69%, el máximo desplazamiento se da en la superficie con 0.063m y un PGA de 0.54g a una profundidad de 19.2m.

El perfil del Arreglo A-02 presenta una máxima deformación a una profundidad de 4.3m con deformación de 0.78%. El último estrato sufre desplazamientos máximos de 0.064m con un PGA de 0.71g, justificando la elevada aceleración.

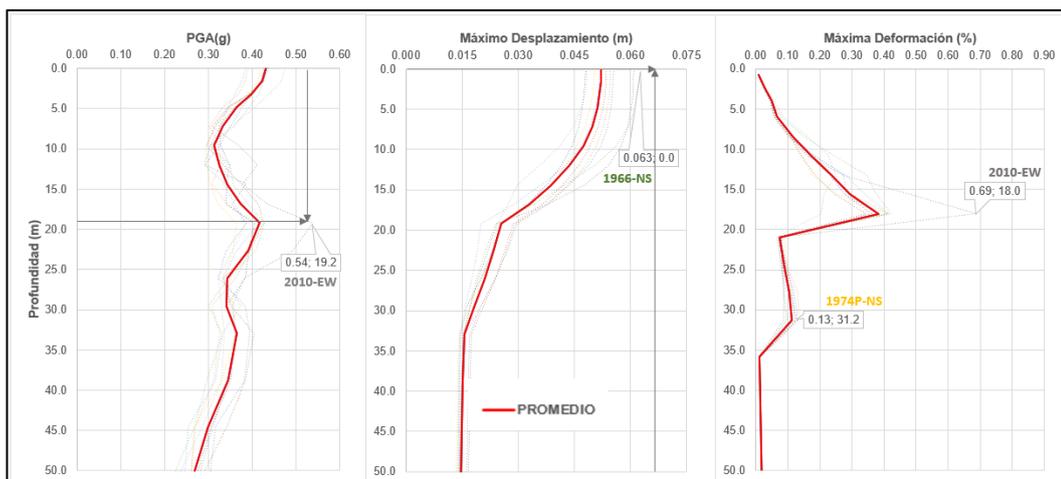


Figura N° 88: Perfiles de aceleración, desplazamiento y deformación máximos – A1– Elaboración Propia.

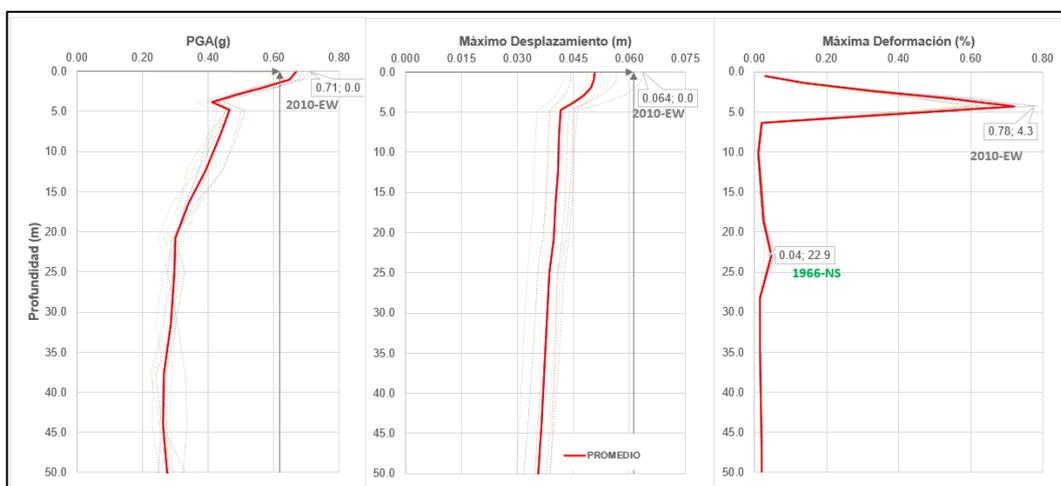


Figura N° 89: Perfiles de aceleración, deformación y desplazamiento máximos – A2– Elaboración Propia.

El perfil del Arreglo A-03 presenta una máxima deformación a una profundidad de 7.8m con deformación de 0.03%, el máximo desplazamiento se da en la superficie con 0.028m con un PGA de 0.82g.

En todos los análisis realizados se identifica una amplificación, en donde predomina mayores PGA, desplazamientos y deformación generado por el sismo de Maule (2010-EW). En los anexos se adjunta los valores promedio de PGA, Desplazamiento y Deformación de los sismos de análisis para los perfiles A-01, A-02 y A-03.

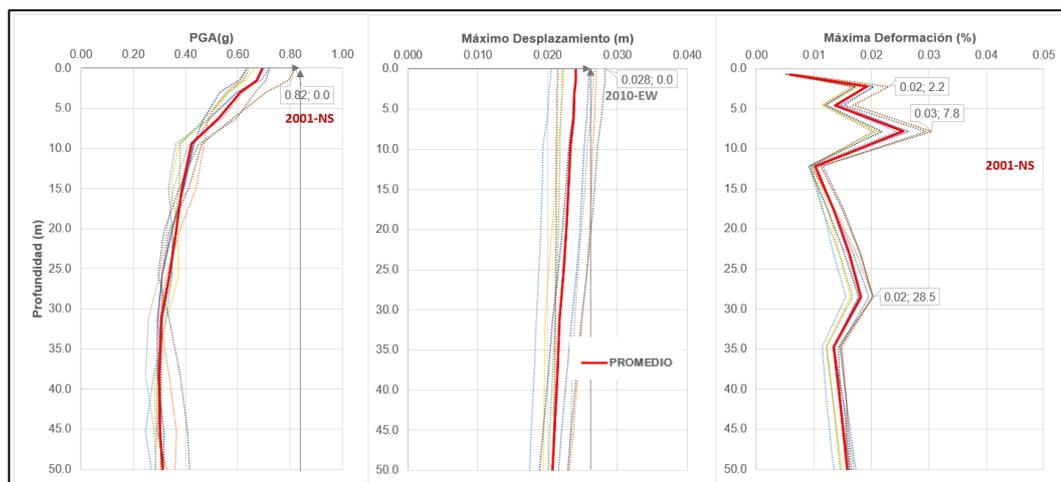


Figura N° 90: Perfiles de aceleración, deformación y desplazamiento máximos – A3– Elaboración Propia.

Los índices de amplificación sísmica dependen de la impedancia entre los estratos de suelo y el basamento rocoso. Para GMPE se utiliza la siguiente formulación:

$$I_m = \frac{V_{roca}}{V_{sitio}} = \frac{V_{roca} T_o}{4H}$$

T_o , H y V_{sitio} : Periodo fundamental, profundidad a la roca y velocidad de ondas de corte promedio hasta la roca, respectivamente

Los Perfiles del A-01 la máxima deformación identificada a la profundidad de 18 m se debe al valor de la impedancia de 1.30 y el A-02 se da a 4.3m de profundidad con un valor de impedancia de 3.5. A diferencia del A-03, que cuenta con máximas deformaciones mayores a 0.03% con profundidades de 2.2, 7.8 y 28.5 m; con valores de impedancia de 1.8, 1.4 y 1.2 m, respectivamente.

6.3.6 Comparación de espectros de aceleraciones

Las respuestas espectrales mostradas a continuación son producto del análisis de cinco registros sísmicos de magnitud considerable registrados en un Suelo Tipo-C (IBC). Cada perfil de suelo posee resultados particulares, a pesar de estar ubicados en depósitos de suelos con periodos picos mayores a 0.1 s, valores de V_{s30} de 338 a 600 m/s (Suelo S1 y S2) y caracterización geotécnica de depósitos superficiales de arenas, limos, arcillas y potencia de gravas.

Los espectros de respuesta de los perfiles demuestran amplificaciones diferentes, teniendo como máxima amplificación la de 4.1 veces el valor de PGA para el sismo de 1966.

El análisis Lineal Equivalente Unidimensional en los perfiles profundos permitió zonificar en función a la envolvente de los espectros de diseño de la Norma E.030:

- Zona S1 se encuentra en el perfil A-03, cuenta con factor de amplificación entre 2.5 a 4.1 para periodos de 0.08 s a 0.14 s.
- Zona S2 se encuentra en el perfil A-02 cuenta con factor de amplificación entre 3.4 a 3.9 para periodos de 0.29 s a 0.39 s.
- Zona S3 se encuentra en el perfil A-01, cuenta con factor de amplificación entre 2.3 a 3.1 para periodos de 0.16 s a 0.82 s.

Finalmente se comparó entre el espectro de diseño propuesta por la norma E030 (2019) y los resultados obtenidos, con el objetivo de sectorizar la zona de estudio basándose en los espectros de respuesta en función al rango de periodos y amplificaciones. El perfil A-01 sería clasificado como un Suelo S3 (Suelos Blandos) debido a las aceleraciones espectros de respuesta obtenido con un rango de periodo amplio (0.16 a 0.82s), a pesar del valor de Vs30 de 323m/s y un periodo predominante de 0.64s. El perfil A-02 sería clasificado como un Suelo S2 (Suelos Intermedio) debido a las aceleraciones espectros de respuesta obtenido con un rango de periodo amplio (0.29 a 0.39s), a pesar del valor de Vs30 de 383m/s y con periodo predominante de 0.32s. El perfil A-03 sería clasificado como un Suelo S1 (Suelos muy Rígido) debido a las aceleraciones espectros de respuesta obtenido con un rango de periodo amplio (0.08 a 0.14s), con el valor de Vs30 de 636m/s.

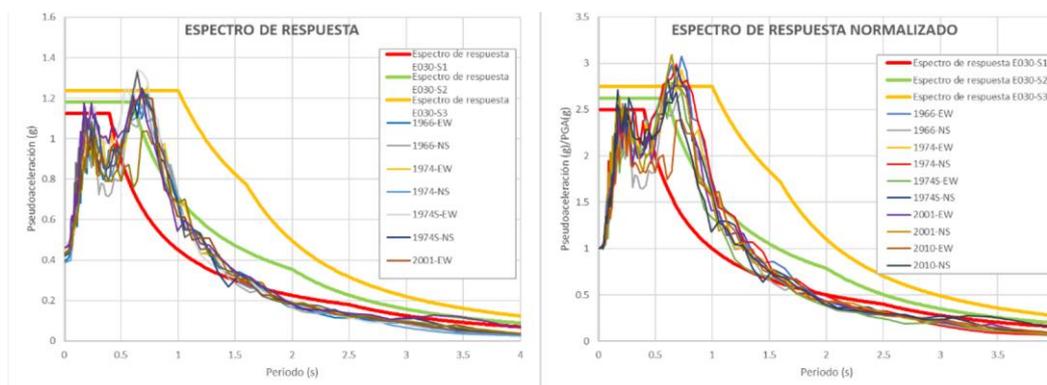


Figura N° 91: Espectro de Respuesta y Normalizado del Arreglo A-01– Elaboración Propia.

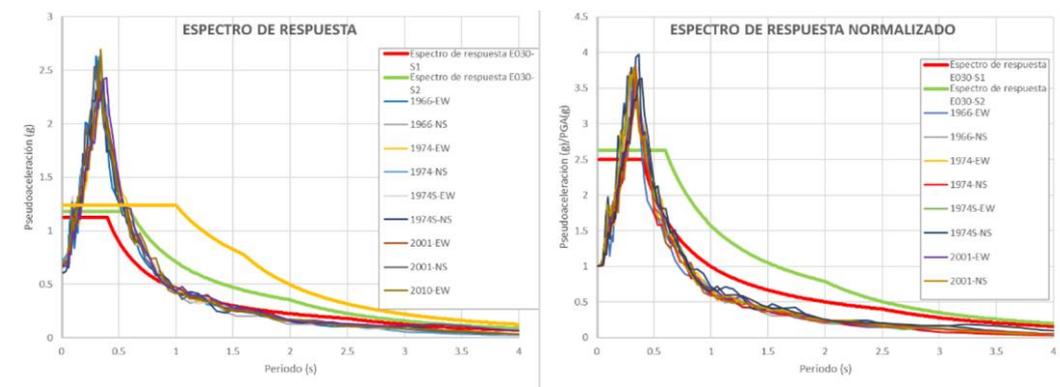


Figura N° 92: Espectro de Respuesta y Normalizado del Arreglo A-02– Elaboración Propia.

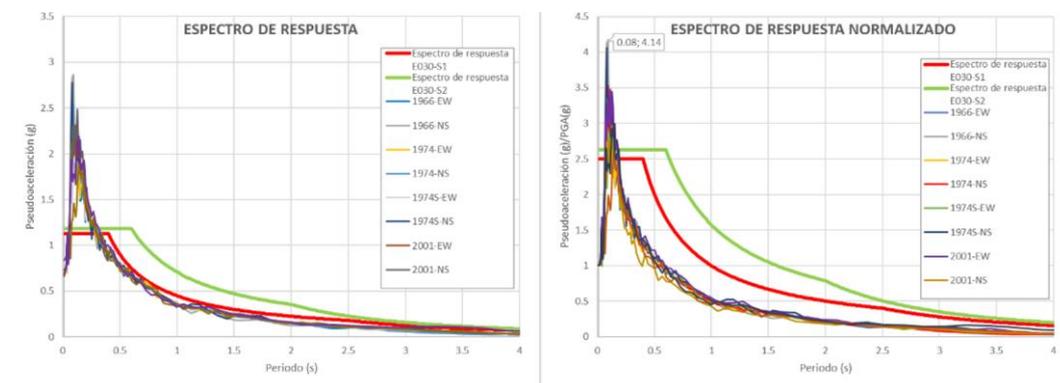


Figura N° 93: Espectro de Respuesta y Normalizado del Arreglo A-03– Elaboración Propia.

La aceleración espectral promedio obtenida de los perfiles profundos fue de 2.1g para un periodo de 0.09 s para un suelo Tipo S1, 2.3g para 0.35s para un Tipo S2 y 1.1g para 0.73s para un Tipo S3.

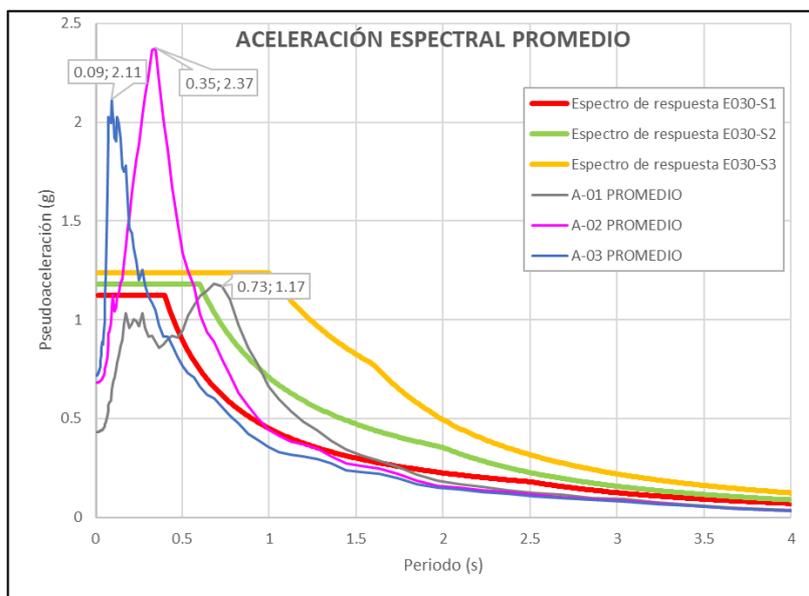


Figura N° 94: Aceleración Espectral Promedio de los Perfiles Profundos– Elaboración Propia.

Concluyendo, la importancia de la exploración de los perfiles de suelo a profundidad o hasta identificar un estrato clasificado como Roca (Suelo Tipo B-IBC) para poder hacer una adecuada clasificación del comportamiento dinámico del suelo.

6.4 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

En el estudio de microzonificación sísmica se consideraron los valores del análisis de amplificación sísmica obtenido de los perfiles profundos (A-01, A-02 y A-03) producto de los ensayos de arreglos de microtremores distribuidos en el distrito junto con las perforaciones recopiladas. El análisis de los registros de Microtremor realizados en la zona de estudio permitió identificar la presencia de dos picos que se desarrolla en la zona llana del distrito, un periodo corto y largo. Debido a que las mediciones de microtremores fueron registrados en condiciones sin perturbaciones refleja un comportamiento elástico lineal, a diferencia de un sismo de magnitud considerable contiene altas frecuencias que no causarían amplificación en periodos altos ($>1s$). La zona llana del distrito de Comas está compuesta principalmente por estratos intercalados de arcilla, limo, arena con matriz gravosa.

El mapa de microzonificación sísmica permite realizar la caracterización de la amenaza sísmica, se elabora de manera multidisciplinaria el cual considera la siguiente información: Mapa de Peligro Geológicos, Mapa de Microzonificación Geotécnica, Mapa de Vs30, Mapa de Isoperiodos, Análisis de Peligro Sísmico Probabilístico y Amplificación Sísmica de Perfiles Profundos.

La Microzonificación Sísmica divide la zona de estudio de la siguiente manera:

6.4.1 Zona I

Esta zona incluye a las gravas de compacidad media a densa y a las formaciones rocosas de la era Mesozoico del Grupo Casma, Lima y Super Unidad Patap. La grava se presenta en toda la zona de estudios, a diferentes profundidades. En la ladera de los cerros y en la Av.22 de agosto próximo a la superficie.

La capacidad portante para una cimentación corrida de 0.60 m de ancho cimentada a una profundidad de 0.80 m a 1.50 m esta zona varía entre 1.5 y 2.5 kg/cm² si se desplanta sobre la grava, y mayor a 3.0 kg/cm² si se desplanta sobre la roca ligeramente alterada o sana. Los materiales identificados en la zona son

favorables para las edificaciones convencionales de acuerdo a las características geotécnicas del suelo. Cabe mencionar la existencia de edificaciones asentados en materiales de rellenos como pircas o escombros en zonas aledañas de los cerros, lo que vuelve vulnerable a las edificaciones existentes.

En esta zona se encuentran período fundamental menor a 0.2s. Al realizar el análisis de amplificación sísmica la respuesta de suelo (A-03) es envuelto completamente por el espectro de diseño propuesta con la norma E030 (2019) por lo que se clasifico como Suelo Tipo S1 (Roca o Suelo Muy Rígido).

6.4.2 Zona II

En esta zona se encuentra predominantemente suelos de grano fino los primeros metros con una consistencia media. La capacidad portante para una cimentación corrida de 0.60 m de ancho cimentada es variable a una profundidad de 1.00 a 1.50 m varía de 0.91 kg/cm² a 1.29 kg/cm² si se desplanta sobre el suelo fino de consistencia media a densa. En la zona de El Pinar y La Alborada se tiene identificado el afloramiento de aguas subterráneas debido a la presencia de un antiguo manantial, en la actualidad se maneja el nivel freático con un sistema de drenaje monitoreado por SEDAPAL. Los materiales identificados en la zona son favorables para las edificaciones convencionales de acuerdo a las características geotécnicas del suelo, por lo que las cimentaciones deben estar sobre terreno natural bajo ninguna circunstancia sobre relleno.

En esta zona se encuentran período fundamental menor a 0.3s, se desarrolla otro periodo con un valor menor a 0.50 s. Lo que evidencia la presencia de impedancia entre los estratos del suelo, pero al realizar el análisis de amplificación sísmica la respuesta de suelo (A-02) es envuelto por el espectro de diseño propuesta con la norma E030 (2019) para un Suelo Tipo S2 (Suelos Intermedios).

6.4.3 Zona III

En esta zona se encuentra predominantemente depósitos de suelo de compacidad media a baja. La capacidad portante del suelo es variable debido a su origen aluvial y fluvial, para una cimentación corrida de 0.60 m de ancho cimentada a una profundidad de 0.80 a 2.50 m con una capacidad máxima de 2.5 kg/cm². Los materiales identificados en la zona son favorables para las edificaciones convencionales de acuerdo a las características geotécnicas del suelo, por lo que

las cimentaciones deben estar sobre terreno natural bajo ninguna circunstancia sobre relleno. Se considera que la cimentación debe estar asentada sobre terreno natural y bajo ninguna circunstancia sobre materiales de rellenos.

En esta zona se encuentran período fundamental mayor a 0.5s. Lo que evidencia la presencia de depósitos profundos de suelo de compacidad media. Al realizar el análisis de amplificación sísmico la respuesta de suelo (A-01) es envuelta dentro del espectro de diseño propuesta con la norma E030 (2019) para un Suelo Tipo S3 (Suelos Blandos).

6.4.4 Zona IV

Comprendido por zonas de pendiente mayor a 10° hasta donde están ubicados a los asentamientos humanos, pero en zonas no habitadas donde el terreno no fue manipulado por las personas las pendientes se incrementan drásticamente llegando hasta máximo los 45°. Además, se tiene registro de existencia de grandes formaciones rocosas intemperizadas, que ante cualquier impacto podría deslizarse o caerse las rocas afectando a la población ubicada en las zonas aledañas debido a la habilitación negligente de la población. En conclusión, la zona IV no sería apta para construir edificaciones.

Se concluye de la Microzonificación Sísmica del Distrito de Comas las Zonas I, II y III ha sido considerada como zonas aptas para la construcción de las edificaciones debido a las características identificadas. Sin embargo, es importante recalcar que los estudios de microzonificación sísmica son evaluaciones multidisciplinarias a un nivel macro, permitiendo una planificación urbana más segura de edificaciones e infraestructuras. No obstante, debido a la variabilidad inherente en las características locales del suelo, se recomienda realizar estudios específicos y detallados en cada sitio de construcción, conforme a lo establecido en la Norma Técnica Peruana de Edificaciones E.030 (Diseño Sismorresistente), que define parámetros de los suelos y los criterios de diseño estructural.

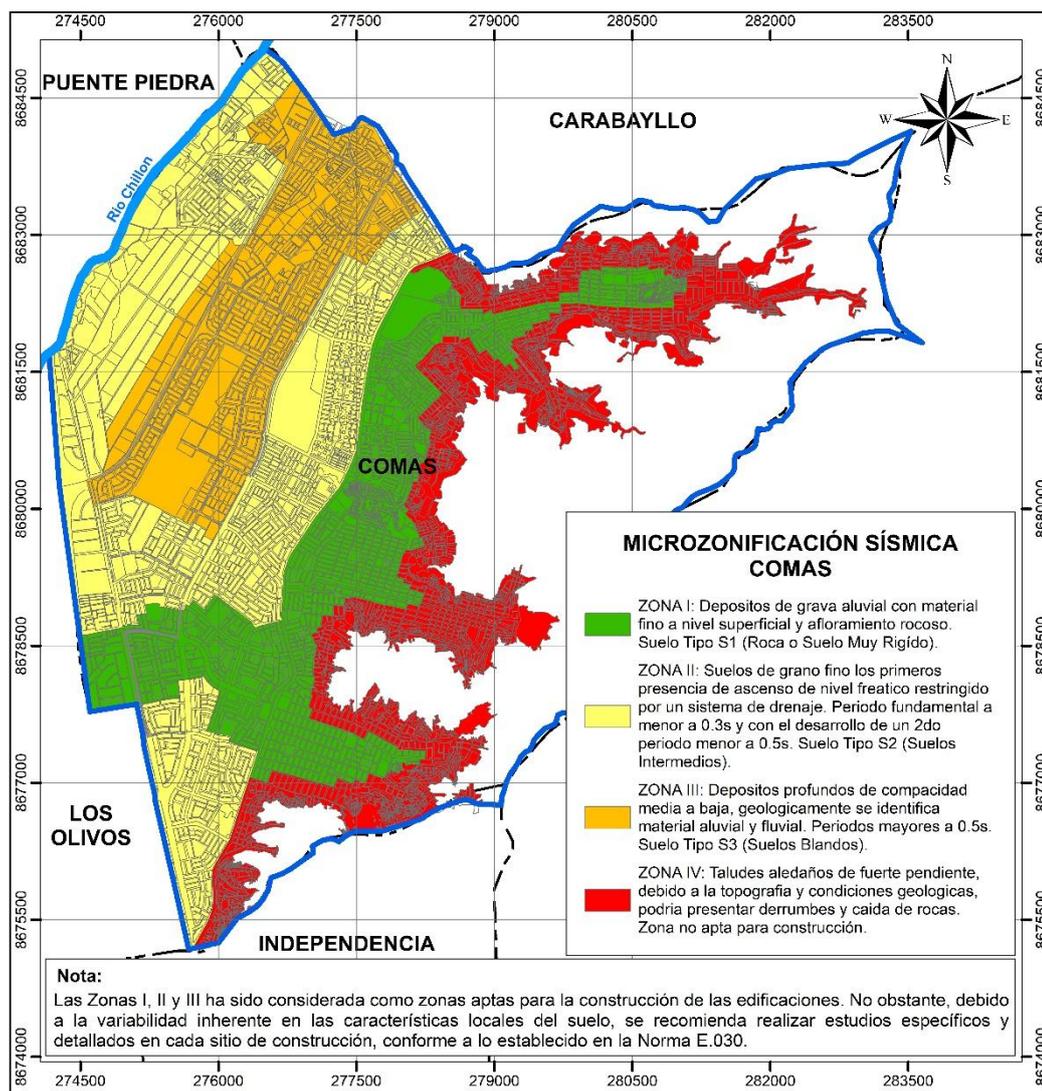


Figura N° 95: Mapa de Microzonificación Sísmica del Distrito de Comas– Elaboración Propia.

CONCLUSIONES

La presente tesis de investigación consistió en realizar el estudio de Microzonificación Sísmica y Amplificación Sísmica del distrito de Comas, para este fin se revisó la geología, sismicidad, geotecnia y geofísica de la zona de estudio; así como se realizaron análisis de amplificación sísmica. Con base en ello, se encontraron las siguientes conclusiones:

PELIGRO SÍSMICO:

Las fuentes sísmicas proporcionada por SENCICO (2016) fue empleada en la presente investigación. Se empleó un Árbol Lógico conformado por 3 leyes de atenuación para fuentes de subducción (Abrahamson, Zhao y Young) y 4 leyes para fuentes continentales (Sadigh, Chiou, Abrahamson, Campbell) para suelo Tipo B con V_{s30} de 767 m/s².

Comparando las aceleraciones espectrales obtenidas de PGA para el Árbol Lógico identificamos que hay una variación de 508 a 517 cm/s² en caso de Roca.

El peligro sísmico de la zona de estudio es muy alto, debido a que presenta aceleraciones máximas del suelo Tipo B de 0.53 g con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años.

Se logró identificar la intensidad en Mercalli Modificada empleando la relación propuesta por Worden (2012), para un periodo de Retorno de 475 años se obtendría intensidad de VIII (Destructivo).

Se obtuvieron resultados congruentes con estudio pasados realizados en la zona de estudio, obteniendo mayores valores que el brindado por el Aplicativo Web SENCICO para un suelo Tipo B para periodos de retorno mayores a 50 años. De igual manera se obtiene un valor mayor de aceleración que el proporcionado por la norma peruana sismorresistente.

La desagregación sísmica en Roca en el Distrito de Comas muestra mayor contribución para los sismos de magnitud de 6.5 y una distancia focal de 90 Km.

El espectro de peligro Uniforme Normalizado en Roca están envuelto dentro del espectro de diseño brindado por la Norma E 0.30 (2019) S1.

Empleando el Mapa de Vs30 podemos identificar la ubicación de las estaciones acelerográficas donde se podría aplicar el Espectro de Peligro Uniforme para Roca (B).

La aceleración horizontal máxima obtenida en Roca (Tipo B) para un espectro respuesta de 5% de amortiguamiento con 10% de probabilidad de excedencia y 50 años de periodo de exposición sísmica para OBE (Operating Basic Earthquake) de 0.53g con 10% de probabilidad de excedencia y para MCE (Maximum Considered Earthquake) de 0.96g con 2% de probabilidad de excedencia.

GEOLOGÍA:

Los aspectos geomorfológicos identificados en el distrito son producto de la geodinámica externa, los sedimentos depositados están compuesto por arena, grava y arcillas a profundidad.

Los aspectos geológicos presentan composición muy heterogénea debido a su conformación, el material aluvial presenta material arcilloso a profundidad, en colinas se encuentra la presencia de depósitos eólicos –arenas.

Los aspectos hidrogeológicos permiten reconocer la presencia de nivel freático a menos de 5 m hasta los 40m de profundidad en la zona llana del distrito. En la actualidad se tiene un sistema de bombeo de aguas subterráneas dirigido por SEDAPAL, lo que genera una alteración del nivel freático causando el fenómeno de subsidencia en la zona central del distrito.

Los fenómenos geodinámicos externos que se desarrollan en la zona de estudio son deslizamientos, derrumbes, caídas de rocas, inundaciones y huaycos. Las quebradas son activadas ante la presencia de fuertes precipitaciones.

Analizando la topografía se identificó pendientes de 30 a 45° en las zonas altas de los cerros con Peligro Muy Alto, además se tiene registro de caídas de rocas y presencia de flujos.

Se realizó la integración de información de estudios geológicos realizados en el distrito, logrando como resultado la sectorización en función al grado de vulnerabilidad identificado para distintos riesgos. El Peligro geológico se dividió en Muy Alto (pendientes fuertemente inclinadas susceptible a caídas de rocas), Alto (movimiento de masas, fenómeno de subsidencia e inundación fluvial), Medio (asentamientos diferenciales potenciales) y Bajo (zona llana del distrito).

GEOTECNIA:

Para el análisis de la caracterización geotécnica se analizaron 137 calicatas (con una profundidad mínima de exploración de 3 m), 7 sondeos con CP (Cono Peck), 10 sondeos con SPT y 50 pozos recopilados. Se generaron mapas de suelo a 1 m de profundidad, 2 m de profundidad y el mapa de microzonificación geotécnica del distrito de Comas. En el mapa producto se identifican los suelos gravosos, arcillosos, limosos, arenosos y relleno en la zona de estudio.

Los ensayos de elementos químicos y la hidrogeología brindaron información de sulfatos, cloruros, sales totales, pH, agua duras y salinas. Se concluyó que no existe peligro por elementos químicos, las zonas de agua dura y ligeramente salina no afectarían la cimentación de las edificaciones debido a que en la actualidad se presenta un control del nivel freático que se encontraría de 5 a 10 m de profundidad.

El análisis de los ensayos especiales recopilados permitió identificar rangos de parámetros geotécnicos, que fueron empleados para la evaluación de los sectores identificados.

La capacidad de carga fue evaluada mediante dos metodologías (Terzaghi y Terzaghi modificada) para la falla general y local corroborando que se obtienen valores más conservadores empleando la metodología de Terzaghi. Se compararon los resultados obtenidos con los resultados proporcionados por el CISMID (2010), siendo verificados nuestros resultados.

El asentamiento elástico fue calculado para una cimentación rígida y flexible, considerando como presión de trabajo la carga última admisible del suelo, en ninguna de las evaluaciones se sobrepasó el valor máximo de asentamiento proporcionado por la norma de 2.54cm.

La microzonificación geotécnica se divide en Zona I (Gravas), Zona II (Arenas, limos y arcillas), Zona III (Arcillas y Limos) y Zona IV (pendiente mayor a 20 grados).

GEOFÍSICA:

Se complementó la información recopilada para la caracterización dinámica, se realizaron ensayos MASW, Refracción Sísmica, Arreglos de Microtremores y Mediciones Puntuales de Microtremores. Para la elaboración de los mapas temáticos se evaluaron en total 141 mediciones puntuales de microtremores, 64 perfiles de velocidades de ondas de corte y 24 perfiles de velocidades de ondas longitudinales.

Los registros de medición de microtremores permitieron identificar la presencia de espectros H/V con picos claros, múltiples, agudos y planos; esto se debería al contraste de impedancia presente en el perfil del suelo.

Se identificó la presencia en sectores donde se desarrollaban dos picos, a lo largo de la Av. Trapiche conforme se acerca a la Av. Túpac Amaru el segundo pico se reduce hasta llegar a desaparecer, el periodo fundamental puede aumentar o disminuir dependiendo de la profundidad del depósito analizado.

Se emplearon formulaciones empíricas para el cálculo de espesores de un depósito sedimentario proporcionado por diversos investigadores. Se concluyó que es necesario la realización de una formulación empírica para cada depósito de suelo ya que depende de su formación, de las formulaciones analizadas la que tuvo mayor proximidad fue la propuesta por Karabulut Ozel para roca sísmica.

Se generaron los Mapas de Vs30 empleando la clasificación de acuerdo a la normativa peruana E030 (2019) donde se identificó suelo S1 y S2; a diferencia de la norma IBC que se identifica el suelo B, C y D. Las estaciones acelerográficas del IGP y del CISMID se encuentran ubicado en suelo S1 o C.

Se desarrollaron dos mapas de Isoperiodos, debido a que en la zona llana del distrito se presentaron dos picos. Ambos mapas tienen en común que en la zona alta se presenta un solo pico con periodos menores o iguales a 0,20s. En el primer mapa de Isoperiodos para la zona baja del distrito se tomó el primer pico con periodos menores a 0.20 s; mientras que, en el segundo mapa, para la zona baja del distrito se tomaron los segundos picos con periodos entre 0.30 y 0.50s, y periodos mayores a 0.50s. Este desarrollo de dos picos de periodos aumenta o disminuyen en función a la profundidad del depósito, e indican la existencia de suelos flexibles en la zona sur del distrito y alrededor de la ribera del río. Este nuevo mapa de Isoperiodos contrasta con el del CISMID (2011) en donde solo se

registraron periodos de 0.10 y 0.20s debido a que se ha hecho una campaña de medición con un análisis más exhaustivo y con nueva tecnología en esta investigación.

AMPLIFICACIÓN Y MICROZONIFICACIÓN

Se emplearon 5 sismos de magnitud considerable (1966,1974 PQR, 1974 SURCO, 2001 y 2010) para el análisis de amplificación, primero se generaron acelerogramas sintéticos realizando un ajuste espectral con el Espectro de Peligro Uniforme para un periodo de retorno de 475 años. El tratamiento de registros sísmicos consistió en aplicar el zero pad en señales analógicas y digitales permitiendo corregir los grandes desplazamientos en sismos de magnitud considerable, lográndose reducir hasta los 5 cm.

Los registros sísmicos empleados al realizar el análisis de amplificación se concluyen que el Sismo de 2010-EW de Maule genera mayores valores de PGA (g), Desplazamientos y Deformaciones; a diferencia del resto de registros. Los perfiles de velocidades de ondas de corte empleado fueron los obtenidos de arreglos ejecutados con profundidad máxima de 120 m con $V_s < 1500\text{m/s}$ (Suelo Tipo B-IBC).

Para los análisis de amplificación unidimensionales se empleó el método lineal equivalente, considerando las curvas de degradación de módulo de corte y amortiguamiento propuesta por Zhang (2005) para limo arenosa y arcilla arenosa, Menq (2003) para grava. Para estratos con $1500\text{m/s} > V_s > 760\text{m/s}$ se empleó curvas de degradación que describan el comportamiento elástico. Se ajustaron mediante una función de reducción propuesta por Darendeli (2001).

Los Espectro Normalizados obtenido de los sismos sintéticos fueron analizados con los Espectros de Diseño que proporciona la Norma y el valor del V_{s30} . Clasificando el perfil A-01, A-02 y A-03 como suelo S3, S2 y S1, respectivamente.

La aceleración espectral promedio obtenida de los perfiles profundos fue de 2.1g para un periodo de 0.09 s para un suelo Tipo S1, 2.3g para 0.35s para un Tipo S2 y 1.1g para 0.73s para un Tipo S3.

El Mapa de Microzonificación Sísmica es generado de la sinergia de las especialidades desarrollada en la presente tesis, se puede dividir en 4 zonas:

La Zona I incluye a las gravas de compacidad media a densa y a las formaciones rocosas. La grava se presenta en toda la zona de estudios, a diferentes profundidades. La capacidad portante para una cimentación corrida de 0.60 m de ancho cimentada a una profundidad de 0.80 m a 1.50 m esta zona varía entre 1.5 y 2.5 kg/cm² si se desplanta sobre la grava, y mayor a 3.0 kg/cm² si se desplanta sobre la roca ligeramente alterada o sana. En esta zona se encuentran período fundamental menor a 0.2s. El análisis de amplificación sísmico de la respuesta de suelo (A-03) es envuelto completamente por el espectro de diseño propuesta con la norma E030 (2019) para un Suelo S1.

La Zona II se encuentra predominantemente suelos de grano fino los primeros metros con una consistencia media. La capacidad portante para una cimentación corrida de 0.60 m de ancho cimentada es variable a una profundidad de 1.00 a 1.50 m varía de 0.91 kg/cm² a 1.29 kg/cm² si se desplanta sobre el suelo fino de consistencia media a densa. En esta zona se encuentran período fundamental menor a 0.3s, pero también se desarrolla otro periodo con un valor menor a 0.50 s. El análisis de amplificación sísmico de la respuesta de suelo (A-02) es envuelta dentro del espectro de diseño propuesta con la norma E030 (2019) para un Suelo S2.

La Zona III se encuentra predominantemente depósitos de suelo profundos de compacidad media a baja. La capacidad portante del suelo es variable debido a su origen aluvial y fluvial, para una cimentación corrida de 0.60 m de ancho cimentada a una profundidad de 0.80 a 2.50 m con una capacidad máxima de 2.5 kg/cm². En esta zona se encuentran período fundamental mayor a 0.5s. El análisis de amplificación sísmico de la respuesta de suelo (A-01) es envuelto dentro del espectro de diseño propuesta con la norma E030 (2019) para un Suelo S3.

La Zona IV lo comprende por zonas de fuerte pendiente en zonas aledañas a los asentamientos humanos. Además, se tiene registro de existencia de grandes formaciones rocosas intemperizadas, que ante cualquier impacto podría deslizarse o caerse las rocas afectando a la población ubicada en las zonas aledañas debido a la habilitación negligente de la población.

RECOMENDACIONES

Debido al control del nivel freático en el distrito de manera periódica, se presenta el fenómeno de subsidencia en la zona central que genero asentamientos considerables, debería poder evaluarse dicho fenómeno y en qué grado afecta a las edificaciones existentes.

Realizar un estudio hidrológico para obtener un modelo de inundación para identificar y sectorizar las viviendas vulnerables ante una inundación fluvial.

Registros sísmicos a disposición publica para la continua actualización de catálogos sísmicos para continuar con las investigaciones.

Se recomienda evaluar leyes de atenuación con el mismo rango de periodo, unidades (en este caso se trabajó con cm/s^2), límite de ordenadas espectrales y cantidad de ordenadas espectrales para emplear el Árbol Lógico. Se puede identificar incongruencias a través de las evaluaciones por ramificaciones del árbol lógico.

Se recomienda ejecutar una grilla no tan fina ya que del número de puntos evaluados dependerá el tiempo de análisis computacional.

El peligro es constante en el tiempo, pero el riesgo y vulnerabilidad generada por la población está en continuo aumento. Se recomienda evaluar el nivel de seguridad de las edificaciones situadas en las zonas vulnerables, para realizar un plan de contingencia ante algún evento.

Permitir la integración de la información brindada junto con la administración pública, para generar estudios de gestión de riesgo a fin de salvaguardar vidas y bienes económicos.

Para el Análisis de Amplificación Sísmica es necesaria mucha información para el modelamiento del comportamiento dinámico, porque es necesario tener mayores ensayos de laboratorio hasta mayores profundidades. Los perfiles sísmicos deben alcanzar la profundidad hasta que se identifique estratos con $V_s < 1500 \text{m/s}$, próximo al basamento Rocoso (Suelo Tipo B-IBC).

Validar los resultados obtenidos del análisis de amplificación con estaciones acelerográficas ubicadas en la zona de estudio. En la actualidad se cuenta con dos estaciones acelerográficas las dos ubicadas en un Suelo S1 (E0.30).

Se recomienda realizar estudios geotécnicos y geofísicos para el diseño de las edificaciones, ya que los valores proporcionados en la presente investigación son referenciales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahamson, N. A., Silva, W. J., & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), pp. 1025-1055. <https://doi.org/10.1193/070913EQS198M>
- Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro Ground Motion Prediction Equation for Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23-44. <https://doi.org/10.1193/051712EQS188MR>
- Aguilar, R., Sangurima, K., Frau, C., Quishpe, M., Quishpe, D., Cauaical, S., y Chunga, K. (2013). Microzonificación sísmica del Centro Norte de Quito. Quito, Ecuador: Investigación científica desde las Aulas (2013). https://www.researchgate.net/profile/Kervin-Chunga/publication/287196109_Microzonacion_sismica_del_Centro_Norte_de_Quito_Segunda_Jornada_de_Investigacion_cientifica_desde_las_Aulas_2013/links/56724d3508ae3aa2fcf04039/Microzonacion-sismica-del-Centro-Norte-de-Quito-Segunda-Jornada-de-Investigacion-cientifica-desde-las-Aulas-2013.pdf
- Aguilar, Z. (2011). Evaluación de Peligro Sísmico. Curso de Sismología y Peligro Sísmico.
- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35(3), 415-456. <https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/43280/1/Aki.pdf>
- Aki, K., & Irikura, K. (1991). Characterization and mapping of earthquake shaking for seismic zonation. Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Zonation. Stanford, CA., 1, 61-110.
- Alva, J. E. (2011). Diseño de Cimentaciones. Lima, Perú, Lima, Perú: Fondo Editorial ICG. 1ra. Edición. https://www.jorgealvahurtado.com/files/Diseno_Cimentaciones.pdf
- Alva, J. E. (2020). Redes Acelerográficas en el Perú. FORO: Importancia de las Redes Acelerográficas para la definición de parámetros de Diseño Sismorresistente. Lima, Lima, Perú. Obtenido de <http://www.jorgealvahurtado.com/files/REDES%20ACELEROGRAFICAS%20DEL%20PERU%20SENCICO%206.pdf>

- Autoridad Nacional del Agua. (2018). Informe Técnico N°091-2018. Autoridad Nacional del Agua. Autoridad Administrativa del Agua Cañete Fortaleza. Administración Local de Agua Chillón. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/5171/descargar>
- Anbazhagan, P. (2013). Method for Seismic Microzonation with Geotechnical Aspects. *Disaster Advances*, 66-85. https://www.researchgate.net/profile/Anbazhagan-Panjamani/publication/287270199_Method_for_Seismic_Microzonation_with_Geotechnical_Aspects/links/572dd44608ae7441518f3c30/Method-for-Seismic-Microzonation-with-Geotechnical-Aspects.pdf?_sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail&_rtd=e30%3D
- Anomohanran, O. (2013). Seismic refraction method: A technique for determining the thickness of stratified substratum. *American Journal of Applied Sciences*, 10(8), 857-862. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2013.857.862>
- Arai, H., & Tokimatsu, K. (2000). Effects of Rayleigh and Love waves on microtremor H/V spectra. *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering*(2232), 1-8. <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/2232.pdf>
- Arai, H., & Tokimatsu, K. (2004). S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(1), 53-63. <https://doi.org/10.1785/0120030028>
- Arai, H., & Tokimatsu, K. (2005). S-wave velocity profiling by joint inversion of microtremor dispersion curve and horizontal-to-vertical (H/V) spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(5), 1766-1778. <https://doi.org/10.1785/0120040243>
- Arredondo, L. (2016). *Aplicación de la norma técnica E-030 "Diseño sismorresistente", en la clasificación de los suelos en el área urbana del distrito de Santa Rosa - Lima*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio - IGP. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/3198>

- American Society for Testing and Materials. (2011). D6066-11 Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potential. American Society of Testing Materials (ASTM). ASTM International. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/78924/90922bd04ffb44d0abd18129195aac03/ASTM-D6066-11.pdf>
- American Society for Testing and Materials. (2017). D2488-17 Standard Practice for Description and Identification of Soils. American Society of Testing Materials (ASTM). ASTM International. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/97952/8baffc0105f34874a4c54c35a402ced7/ASTM-D2488-17.pdf>
- American Society for Testing and Materials. (2018). D1586-18 Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. American Society of Testing Materials (ASTM). ASTM International. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/102094/fed0dbb7aa0c411da568006b2be2f86e/ASTM-D1586-D1586M-18.pdf>
- American Society for Testing and Materials. (2018). D420-18 Standard Guide for Site Characterization for Engineering Design and Construction Purposes. American Society of Testing Materials (ASTM). ASTM International. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/99590/1ee3fd21caec4503a532a722166233eb/ASTM-D420-18.pdf>
- American Society for Testing and Materials. (2018). D5777-18 Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. American Society of Testing Materials (ASTM). ASTM International. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/102218/3e1f5d8156bc47a68748afc323d1d727/ASTM-D5777-18.pdf>
- Badillo, E. J., y Rodríguez, A. R. (1990). Mecánica de suelos Tomo I, Fundamentos de la mecánica de suelos. México, D.F: Editorial Limusa, tercera edición. <https://veteranos1927.files.wordpress.com/2014/05/mecanica-de-suelos-tomo-1-juarez-badillo.pdf>
- Benites, R., & Aki, K. (1994). Ground motion at mountains and sedimentary basins with vertical seismic velocity gradient. *Geophysical Journal International*, 116(1), 95-118. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb02130.x>

- Bermudez, M. F. (2002). Uso de las microtrepidaciones para la evaluación de la respuesta dinámica de los suelos. SIMPOSIO COLOMBIANO DE SISMOLOGÍA "Avances de la sismología en los últimos veinte años".(10: 2002: Santa Fe de Bogotá). Memorias del primer simposio colombiano de sismología. Bogotá, Universidad Nacional, Ingeominas.
- Brooker, E. W., & Ireland, H. O. (1965). Earth Pressures at Rest Related to Stress History. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(1), 1-15.
<https://doi.org/10.1139/t65-001>
- Cabrejos, J. (2013). *Amplificación Sísmica en la ciudad de Lima aplicando la Técnica de Cocientes Espectrales*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional - UNI.
<http://hdl.handle.net/20.500.14076/2919>
- Cahill, T., & Isacks, B. (1992). Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *Journal of Geophysical Research*, 97(12), 17503-17529.
<https://doi.org/10.1029/92JB00493>
- Campbell, K., & Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1087-1115.
<https://doi.org/10.1193/062913EQS175M>
- 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>
- Carrillo, A. (1979). Estabilidad y resistencia del conglomerado de Lima Metropolitana. *Revista El Ingeniero Civil*, 1(1),1-8.
<https://es.scribd.com/document/265352656/Conglomerado-de-Lima>
- Casaverde, L., y Vargas, J. (1980). Zonificación sísmica del Perú. II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente, Organización de Estados Americanos y Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2014). Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión. Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). Lima, Perú: Dirección

- de Gestión de Procesos (DGP) - Subdirección de Normas y Lineamientos (SNL). <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/257/descargar>
- Charca, O., Gamarra, C., y Parra, D. (2018). Selección de Leyes de Atenuación Sísmica de Subducción para la Evaluación del Peligro Sísmico en el Perú. XX Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Lima, Perú, 23 Al 27 De Abril Del 2018. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/18241>
- Chávez, J. (2006). *Leyes de Atenuación para Aceleraciones Espectrales en el Perú*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería Civil]. Internet Archive Scholar. https://scholar.archive.org/work/eovfja4ev5cvjjwdgjtbs27m/access/wayback/http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/4224/1/chavez_oj.pdf
- Chiew, C., Cheah, Y., Tan, C., & Lau, T. (2017). Estimation of Soft Sediment Thickness in Kuala Lumpur Based on Microtremor Observation Data. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 1892(1), 1-8. <https://doi.org/10.1063/1.5005743>
- Chiou, B., & Youngs, R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117-1153. <https://doi.org/10.1193/072813EQS219M>
- Cho, I., Tada, T., & Shinozaki, Y. (2004). A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms. *Geophysics*, 1(1), 1535–1551. <https://doi.org/10.1190/1.1836827>
- Cho, I., Tada, T., & Shinozaki, Y. (2006). New methods of microtremor exploration: the centerless circular array method and the two-radius method. Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 1, 335-344. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54201474>
- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigaciones de Desastres & Instituto para la Mitigación de los Efectos de El Niño. (2017). Evaluación de Daños Generados por el Desborde del Río Chillón en los distritos de Carabayllo y Comas. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigaciones de Desastres (CISMID) & Instituto

para la Mitigación de los Efectos de El Niño (IMEFEM). Lima, Perú:
Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigaciones de
Desastres. (2004). Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de 32 distritos de Lima
y Callao. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y
Mitigación de Desastres (CISMID). Lima, Perú: Informe Técnico.

Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigaciones de
Desastres. (2011). Estudio de Microzonificación Sísmica y Vulnerabilidad
en la Ciudad de Lima. Microzonificación Sísmica del Distrito de Comas.
Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de
Desastres (CISMID). Lima, Perú: Convenio Específico de Cooperación
Interinstitucional entre el Ministerio de Vivienda, Construcción y
Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería.
[https://www.gob.pe/institucion/programa-nuestras-ciudades/informes-
publicaciones/375282-estudios-de-microzonificacion](https://www.gob.pe/institucion/programa-nuestras-ciudades/informes-publicaciones/375282-estudios-de-microzonificacion)

Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigaciones de
Desastres. (2018). Programa de Medición Puntual de Microtrepidaciones y
de Arreglo de Microtrepidaciones en el Proyecto Inmobiliario "Los Parques
de Comas". Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y
Mitigación de Desastres (CISMID). Lima, Perú: ZER GEOSYSTEM PERÚ
S.A.C.

Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigaciones de
Desastres. (2021). Fusión de Algoritmos de Machine Learning y
Tecnologías de Observación de la Tierra para la Mitigación de Desastres.

Consortio Nippon Koei. (2009). Estudio de Impacto Ambiental detallado del
proyecto" Optimización de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado,
Sectorización, Rehabilitación de redes y Actualización de Catastro-Area de
influencia Planta Huachipa-Área de Drenaje Comas-Chillon-Lima.
MOCSGSAC.

Converse, A. (1992). BAP: basic strong-motion accelerogram processing software,
version 1.0 . Virginia: US Department of the Interior, US Geological Survey.
https://escweb.wr.usgs.gov/nsmp-data/bap/BAP_v10.pdf

- Converse, A. M., & Brady, A. G. (1992). Basic Strong-Motion Accelerogram Processing Software Version 1.0. United States Geological Survey Open-File Report. <https://pubs.usgs.gov/of/1992/0296a/report.pdf>
- Cornell, C. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the seismological society of America*, 58(5), 1583-1606. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583>
- Cornell, C., & Vanmarcke, E. (1969). The major influences on seismic risk. *Proceedings of the fourth world conference on earthquake engineering*, 1(1), 69-83. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/4_vol1_A1-69.pdf
- Das, B. M. (2006). Principles of Geotechnical Engineering 7th Edition. Cengage Learning. <https://pdfcoffee.com/download/principles-of-geotechnical-engineering-7th-edition-pdfdrive--pdf-free.html>
- Diaz, M. (2010). *Microzonificación Sísmica de la ciudad de Pisco*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional - UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/464>
- Dorbath, L., Cisternas, A., & Dorbath, C. (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(3), 551-576. <https://doi.org/10.1785/BSSA0800030551>
- Esteva, L. (1968). *Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico*. [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fidel, L., Zavala, B., Núñez, S., y Valenzuela, G. (2006). Capítulo IX Amenazas por Movimientos en Masa. En INGEMMET, Estudio de Riesgos Geológicos del Perú. Franja 4. (págs. 255-317). Lima, Perú: INGEMMET, Serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica, N° 29, 386p., 19 mapas escala 1:900,000. <https://www.calameo.com/read/000820129584d389a14fc>
- Gamarra, C. (2009). *Nuevas Fuentes Sismogénicas para la Evaluación del Peligro Sísmico y Generación de Espectros de Peligro Uniforme en el Perú*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional - UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/1601>

- GEOINSTRUMENTS. (2017). Servicio de Consultoría para la determinación del comportamiento Dinámico del suelo en función de la velocidad de propagación de ondas. SENCICO.
- Giardini, D., Grunthal, G., Shedlock, K., & Zhang, P. (1999). The GSHAP Global Seismic Hazard Map. *Annali Di Geofisica*, 42(6), 1225-1230. <https://www.earth-prints.org/bitstream/2122/1396/1/18%20giardini.pdf>
- Godoy, C., González, L., y Sáez, E. (2015). Importancia de la velocidad de onda de corte y del período predominante para la evaluación de la respuesta de sitio en Santiago. *Obras y Proyectos* 17, 1(1), 61-67. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132015000100008>
- Guardia, P., y Tavera, H. (2011). *Determinación de la Superficie de Acoplamiento Sísmico Interplaca en el Borde Occidental del Perú*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio - IGP. <https://repositorio.igp.gob.pe/server/api/core/bitstreams/07b0461e-4587-4a71-afa6-0ee48175e9ed/content>
- Gumbel, E. (1958). *Statistics of Extremes* (Vol. 201). New York: Columbia University Press. https://books.google.com.pe/books?id=ku18nuinb4wC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Hasal, M. E., Iyisan, R., Khanbabazadeh, H., Bayin, A., Cevikbilen, G., & Kepceoglu, O. (2013). A Preliminary Seismic Microzonation Study Based on Microtremor Measurements. International Conference: Skopje Earthquake-50 years of European Earthquake Engineering, Skopje. https://www.researchgate.net/publication/327968426_A_Preliminary_Seismic_Microzonation_Study_Based_on_Microtremor_Measurements
- Herraíz, M. (1997). *Conceptos Básicos de Sismología para Ingenieros*. Lima, Perú: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. <https://faeng.ufms.br/files/2019/06/sismologia-para-ingenieros-free.pdf>
- Herrera, D. (2013). *Caracterización de sitio para el área urbana de Chosica utilizando métodos sísmicos (Distrito de Lurigancho - Chosica, Lima)*.

- [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa]. Repositorio - IGP. <https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/1312/tesisHerrera.pdf>
- International Building Code. (2015). International Building Code. Washington D.C., USA: International Building Code (IBC). International Code Council. <https://codes.iccsafe.org/content/IBC2015NY1/copyright>
- Instituto Geofísico del Perú. (2014). Re-Evaluación del Peligro Sísmico Probabilístico para el Perú. Instituto Geofísico del Perú (IGP). Lima, Perú: Proyecto en Cooperación con el Banco Mundial. https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/IGP/783/evaluacion_Peligro_Sismico_Peru.pdf?sequence=1
- Instituto Geofísico del Perú. (2018). Mapa Sísmico del Perú. Periodo: 1960-2017. Obtenido de Instituto Geofísico del Perú (IGP). Sistema Nacional de Información Ambiental: <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-sismico-peru-periodo-1960-2017>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (1992). Geología de los Cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica (24-i, 24-j, 25-i y 25-j). Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Boletín N°43 Serie A: Carta Geológica Nacional. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/163>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2009). Primer Reporte de Zonas Críticas por Peligros Geológicos en Lima Metropolitana. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Lima, Perú: Informe Técnico. Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2369>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2010). Primer Reporte de Zonas Críticas por Peligros Geológicos en la Cuenca del Río Chillón. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Lima, Perú: Informe Técnico. Geología Ambiental. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/INGEMMET/Zonas%20criticas%20por%20peligros%20geologicos%20Cuenca%20Rio%20Chillon.pdf>

- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2015). Peligros Geológicos en el área de Lima Metropolitana y la Región Callao. Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
<https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/3652/descargar>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2017). Mapa Geológico del Cuadrángulo de Chancay - Hoja 24i y 24j. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Lima, Perú: OSI - Cartografía Geológica Digital.
<https://www.calameo.com/read/000820129f57f3c768b07>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2020). Mapa de Inventario de Peligro Geológico. Obtenido de Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Mapa de Zonas Críticas de Peligro Geológico:
<https://www.ingemmet.gob.pe/mapa-de-zonas-criticas-a-los-peligros-geologicos>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2020). Mapa Geomorfológico del Perú. Obtenido de Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Sector Energía y Minas: <https://www.ingemmet.gob.pe/mapa-geomorfologico>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2020). Mapa Hidrogeológico del Perú. Obtenido de Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Sector Energía y Minas: <https://www.ingemmet.gob.pe/mapa-hidrogeologico>
- Instituto Geofísico del Perú. (2021). Estudio del peligro sísmico en la zona de acantilados de la Costa Verde - Lima. Informes Técnicos (184)- IGP.
<https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/11603/descargar>
- Información Referenciada geoespacialmente Integrada en un Sistema. (2019). Seismic Monitor. Obtenido de Información Referenciada geoespacialmente Integrada en un Sistema (IRIS). Earthquake Channel Display:
<http://ds.iris.edu/seismon/>
- Jáky, J. (1948). Pressure in silos. *Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1(1), 103–107. https://www.issmge.org/uploads/publications/1/43/1948_01_0021.pdf
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of geophysical research*, 82(20), 2981-2987.
<https://doi.org/10.1029/JB082i020p02981>

- Karabulut, S., & Ozel, O. (2018). 3-D shear wave velocity structure beneath the European Side of Istanbul from seismic noise arrays analysis. *Geophysical Journal International*, 215(3), 1803–1823. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy370>
- Kitsunezaki, C., Goto, N., Kobayashi, Y., Ikawa, T., Horike, M., Saito, T., & Okuzumi, K. (1990). Estimation of P- and S- wave velocities in Deep Soil Deposits for Evaluating Ground Vibrations in Earthquake. *Journal of the Japan Society for Natural Disaster Science*, 9(1), 1-17.
- Klass, H., & Steinrath, H. (1956). Die Korrosion des Eisens und ihre Verhütung. Mit 91 Tafeln. Verlag Stahleisen. <https://doi.org/10.1002/maco.19570080720>
- Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall civil engineering and engineering mechanics series. <https://faculty.washington.edu/kramer/GEEbook.pdf>
- Kudo, K., Kanno, T., Okada, H., Ozel, O., Erdik, M., Sasatani, T., & Yoshida, K. (2002). Site-specific issues for strong ground motions during the Kocaeli, Turkey, earthquake of 17 August 1999, as inferred from array observations of microtremors and aftershocks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1), 448-465. <https://doi.org/10.1785/0120000812>
- Lawrence, J., & Wiens, D. (2004). Combined receiver-function and surface wave phase-velocity inversion using a Niching genetic algorithm: Application to Patagonia. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(3), 977 – 987. <https://doi.org/10.1785/0120030172>
- Lazares La Rosa, F., Almora, J., López Vásques, J., Cabrejos Hurtado, J. J., & Piedra Rubio, R. (2007). Analysis of accelerograms, Ica earthquake of August 15, 2007. International Conference of Earthquake Engineering, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), Universidad Nacional de Ingeniería. https://www.eeri.org/lfe/pdf/peru_pisco_eeri_preliminary_reconnaissance.pdf
- Lazares, L. F. (2017). Sismología CIP. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID).

- Lin, C., Lin, C., & Chien, C. (2017). Dispersion analysis of surface wave testing - SASW vs. MASW. *Journal of Applied Geophysics* 143(1), 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.05.008>
- Ludwig, W., Nafe, J., & Drake, C. (1970). Seismic refraction. *The Sea*, 4(1), 53-84. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(70\)90067-7](https://doi.org/10.1016/0011-7471(70)90067-7)
- Mallma A., F. A. (2019). *Herramientas geomáticas para la evaluación de zonas urbanas amenazadas por deslizamiento de material en laderas*. [Tesis de título profesional, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional de la URP. <https://repositorio.urp.edu.pe/bitstreams/c231693d-0b21-41de-bb1d-be7577e13fdb/download>
- Malpartida, K. (2017). *Obtención del Factor de Zona Sísmico "Z" mediante el software Crisis 2015 ver.4.1 en la Ciudad de Huánuco 2017*. [Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional - UDH. <http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/673>
- Mamani P., Y. F. (2021). Geología del cuadrángulo de Chosica (hojas 24j1, 24j2, 24j3, 24j4). INGEMMET, Boletín, Serie L, 38, 80 p., 4 mapas. <https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=49623>
- Mantovani, A., Valkaniotis, S., Rapti, D., & Caputo, R. (2018). Mapping the Palaeo-Piniada Valley, Central Greece, Based on Systematic Microtremor Analyses. *Pure Appl. Geophys.* 175(1), 865–881. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1731-7>
- Menq, F. Y. (2003). Dynamic properties of sandy and gravelly soils. The University of Texas at Austin. <http://hdl.handle.net/2152/779>
- Mert, A. S. (2005). S Wave Velocity Structure Obtained from SPAC Method and Array Microtremor Measurements. International Conference on Earthquake Engineering. https://www.academia.edu/download/67843847/S_WAVE_VELOCITY_STRUCTURE_OBTAINED_FROM_20210702-15858-1j8ompe.pdf
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2004). Estudio Integral de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Chillón. Inventario de Fuentes de Agua Subterránea en el Valle del Río Chillón. Ministerio de Agricultura. Instituto Nacional de

- Recursos Naturales (MINAGRI). Lima, Perú: Intendencia de Recursos Hidricos. Administración Técnica del distrito de Riego Chillón-Rímac-Lurín. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/1725>
- Miyakoshi, K., Okada, H., & Ling, S. (1996). Maximum wavelength possible to estimate phase velocities of surface waves in microtremors. Proceedings of the 94th SEGJ Conference, 178-182.
- Montalva, G., Leyton, F., & Ramírez, P. (2012). A preliminary study of seismic microzonation of Concepción based on microtremors, geology and damages patterns. *Obras y proyectos*, 1(11), 40-46. <https://oyp.ucsc.cl/wp-content/uploads/sites/76/2023/06/oyp11.pdf#page=40>
- MR & Asociados S.A.C. (2012). Servicio de Perforaciones Diamantinas y Ensayos Geotécnicos en los Distritos de Villa el Salvador, Cercado de Lima y Región del Callao.
- Municipalidad Distrital de Comas. (2017). Presupuesto Institucional de Apertura Año Fiscal 2018. Lima, Perú: Gerencia de Planeamiento, Presupuesto y Racionalización.
- Muñoz, A. (2020). Apuntes del curso: Ingeniería Antisísmica. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute*, 30(1), 25-33.
- Noor, M., & Kamruzzaman, M. (2011). Microtremor measurements of two historical mosques in Bangladesh. 4th Annual Paper Meet and 1st Civil Engineering Congress, 303-308. ISBN: 978-984-33-4363-5
- Ordaz, M., & Salgado-Gálvez, M. (2019). R-CRISIS Validation and Verification Document. Mexico city, Mexico: ERN Technical Report. http://www.r-crisis.com/Content/files/R-CRISIS%20V_AND_V%20Document_V1%20Full%20document.pdf
- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Journal of Geophysics*, 64(3), 800-808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>

- Pretell, A. (2014). *Microzonificación Sísmica para el ámbito de la ciudad de Pisco y distritos de San Clemente, Túpac Amaru, San Andrés y Paracas*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional - UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/3058>
- Quispe, M. (2012). *Exploración Geofísica mediante Métodos de Refracción Sísmica y MASW 1D en proyectos de Ingeniería Civil*. [Informe de Competencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional - UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/15301>
- Quito, J., Lucas, E., Cencia, J., Chuquin, R., y Barreto, A. (2021). *Evaluación de análisis de respuesta de sitio unidimensional aplicado en un centro educativo en el distrito de Puente Piedra*. [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio de Tesis - PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/18061>
- Ramos, J. (2017). *Microzonificación Sísmica del distrito de Ancón*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional - UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/9524>
- Ramos, A., Gomes, R. C., & Fonseca, A. V. (2018). Assessment of Seismic Site Response Based on Microtremor Measurements. *16th European Conference on Earthquake Engineering Thessaloniki*, 1(1), 18-21. <https://www.academia.edu/download/84384229/assessment.pdf>
- Rezaei, S., & Choobbasti, A. (2017). Application of the microtremor measurements to a site effect study. *Earthquake Science*, 30(3), 157-164. <https://doi.org/10.1007/s11589-017-0187-2>
- Richter, C. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25(1), 1-32. <https://doi.org/10.1785/BSSA0250010001>
- Richter, C. F. (1958). *Elementary Seismology*. W.H.Fleeman and Company, San Francisco, California. <https://calteches.library.caltech.edu/1851/1/books.pdf>
- Riofrío, G. (2002). *The case of Lima, Peru*. DESCO Programa Urbano. Obtenido de Development Planning Unit University College London. Understanding

Slums: Case Studies for the UN Global Report 2003: www.ucl.ac.uk/dpuprojects/Global_Report/pdfs/Lima.pdf

Reglamento Nacional de Edificación. (2018). E.050 Suelos y Cimentaciones. Título III-Edificaciones. Reglamento Nacional de Edificación (RNE). Dirección de Vivienda. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), Lima, Perú. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2686414/E.050%20Suelos%20y%20Cimentaciones.pdf>

Reglamento Nacional de Edificación. (2019). E.030 Diseño Sismorresistente. Título III-Edificaciones. Reglamento Nacional de Edificación (RNE). Dirección de Vivienda. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), Lima, Perú. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2686410/E.030%20Dise%C3%B1o%20Sismo%20resistente.pdf>

Roncal, M. (2017). *Determinación del Peligro Sísmico en el Territorio Nacional y Elaboración de Aplicativo Web*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional - UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/12214>

Sadigh, K., Chang, C., Egan, J., Makdisi, F., & Youngs, R. (1997). Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data. *Seismological Research Letters*, 68(1), 180-189. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.180>

Sánchez Rodríguez, S., y Rodríguez Ortiz, J. (2016). Caracterización de suelos granulares gruesos.El caso de la Grava de Lima. Reconocimiento, tratamiento y mejora del terreno: 10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica: A Coruña, 19, 20 y 21 de octubre de 2016, 305-312. https://www.researchgate.net/profile/Sergio-Sanchez-8/publication/309346550_Caracterizacion_de_suelos_granulares_gruesos_El_caso_de_la_Grava_de_Lima/links/580a1a8308ae08a30234bcd4/Caracterizacion-de-suelos-granulares-gruesos-El-caso-de-la-Grava-de-Lima.pdf

- Sauter, F. (1989). *Fundamentos de Ingeniería Sísmica. Introducción a la sismología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
<https://faeng.ufms.br/files/2019/06/sismologia-para-ingenieros-free.pdf>
- Seed, H., & Idriss, I. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249-1273. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.000166>
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. (2016). Actualización del Programa de Cómputo Orientado a la Determinación del Peligro Sísmico en el País. Lima, Perú: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO).
<http://ppsh.sencico.gob.pe/static/informe.pdf>
- Shuan, L. (2011). *Investigación de la Matriz en las gravas del Perú modelo Grava de Ventanilla*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería Civil]. Repositorio Institucional - UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/818>
- Sifuentes, A. (2012). *Microzonificación Geotécnica Sísmica del Distrito de la Molina*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Alicia. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/2934>
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513 -1974). Instituto de Geología y Minería. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica., 3,130.
<https://www.jorgealvahurtado.com/files/HistoriaSismosNotablesPeruSilgado.pdf>
- Soto, J., y Alva, 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 Civil]. Internet Archive Scholar.
https://scholar.archive.org/work/e6tpocukjib23iqkaycpxw6aey/access/wayback/http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/5413/1/soto_hj.pdf
- Soto, J., y Alva, J. (2021). *Factores de Amplificación en la Ciudad de Lima mediante el Análisis de Respuesta de Sitio*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Ingeniería Civil]. Repositorio Institucional - UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/22982>

- Tacunán, S. (2014). Historia al norte de Lima. *Summa Humanitatis*, 7(1), 166-218.
https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/summa_humanitatis/article/view/8279
- Tada, T. (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. (2014). Evaluación del peligro asociado a los sismos y efectos secundarios en Perú. Lima: Instituto Geofísico del Perú (IGP).
<https://repositorio.igp.gob.pe/server/api/core/bitstreams/10765aa2-6055-40a3-9f74-a781b7758c9d/content>
- Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. *Wiley*, 1(1) 11-15.
<https://dx.doi.org/10.1002/9780470172766>
- Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice* 2nd ed. John Wiley & Sons.
<https://archive.org/details/soilmechanicsine0000unse/page/n7/mode/1up>
- Universidad de los Andes. (2002). Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales. Bogotá, Colombia: Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles.
https://idea.manizales.unal.edu.co/sitios/gestion_riesgos/descargas/microzon/informe_final.pdf
- Verdugo, R. (2008). Amplificación Sísmica. Santiago, Chile: Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/1/CI79F/1/material_docente/bajar?id_material=163856
- Vogt, R. (1987). Einfluss von Tälern auf die Seismischen Bodenbewegungen ("Influencia de los valles sobre el movimiento del terreno"). Zurich: Birkhäuser Verlag. Nr. 158, Institut für Baustatik und Konstruktionen, ETH.
<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000412255>
- Wathelet, M., Jongmans, D., & Ohrnberger, M. (2005). Direct Inversion of Spatial Autocorrelation Curves with the Neighborhood Algorithm. *Bulletin of the*

- Seismological Society of America*, 95(5), 1787-1800.
<https://doi.org/10.1785/0120040220>
- Woolery, E. , & Street, R. (2002). 3D near-surface soil response from H/V ambient-noise ratios. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9), 865-876.
[https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00109-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00109-4)
- Worden, C. , Gerstenberger, M. , Rhoades, D. , & Wald, D. (2012). Probabilistic relationships between ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(1), 204–221. <https://doi.org/10.1785/0120110156>
- Yamanaka, H., & Ishida, H. (1996). Application of genetic algorithms to an inversion of surface-wave dispersion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1(1), 436-444.
<https://doi.org/10.1785/BSSA0860020436>
- Youngs, R., Chiou, S., Silva, W., & 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>
- ZER Geosystem Perú S.A.C. (2018). Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cimentación para el Proyecto "Mall Collique". Lima, Perú: Consorcio DHMONT & CG&M. ZER Geosystem Perú S.A.C.
- Zhang, J. A. (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., . . . Fukushima, Y. (2016a). 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), 1535–1551.
<https://doi.org/10.1785/0120150107>
- Zhao, J. X., Liang, X., Jiang, F., Xing, H., Zhu, M., Hou, R., & Somerville, P. G. (2016b). 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(4), 1518–1534. <https://doi.org/10.1785/0120150110>

ANEXOS

Anexo 1: Ensayos Estándar de Mecánica de Suelos – Calicatas.....	181
Anexo 2: Ensayos Estándar de Mecánica de Suelos – SPT	184
Anexo 3: Ensayos Especiales de Mecánica de Suelos - Consolidación U	184
Anexo 4: Ensayos Especiales de Mecánica de Suelos - Compresión U	185
Anexo 5: Ensayos Especiales de Mecánica de Suelos - CD.....	185
Anexo 6: Ensayos Especiales de Mecánica de Suelos - Químicos.	185
Anexo 7: Microtremores Recopilados	186
Anexo 8: Espectro H/V de Microtremores Ejecutados.....	187
Anexo 9: Ensayo MASW Ejecutados	197
Anexo 10: Ensayo Refracción Sísmica Ejecutados.....	209
Anexo 11: Medición de Arreglos de Microtremores Ejecutados	220
Anexo 12: Espectro de Peligro Uniforme (EPU) en Roca.....	223
Anexo 13: Registros Sísmicos Evaluados para el EPU-Normalizado.....	223
Anexo 14: Espectro de Respuesta A-01-Prof.....	224
Anexo 15: Espectro de Respuesta A-01-Perfil	226
Anexo 16: Espectro de Respuesta en Superficie A-01.....	227
Anexo 17: Máxima Amplificación del Suelo A-01.	229
Anexo 18: Espectro de Respuesta A-02-Prof.....	231
Anexo 19: Espectro de Respuesta A-02-Perfil	232
Anexo 20: Espectro de Respuesta en Superficie A-02.....	234
Anexo 21: Máxima Amplificación del Suelo A-02.	236
Anexo 22: Espectro de Respuesta A-03-Prof.....	237
Anexo 23: Espectro de Respuesta A-03-Perfil	239
Anexo 24: Espectro de Respuesta en Superficie A-03.....	241
Anexo 25: Máxima Amplificación del Suelo A-03.	242
Anexo 26: Valores Promedio de PGA, Desplazamiento y Deformación.	244

Anexo 1: Ensayos Estándar de Mecánica de Suelos – Calicatas

Resumen de los Resultados de los Ensayos Estándar de Mecánica de Suelos – Calicatas Recopiladas en el Distrito de Comas.

REC.	NOMBRE DEL GRUPO	SUCS	w (%)	G (%)	A (%)	F (%)	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	PROF. (m)
CR-37	Arcilla delgada arenosa	CL	7.1	1.3	40.0	58.7	24	15	9	0.00-0.80
	Grava bien gradada con arena	GW	1.3	66.9	32.2	0.9	NP	NP	NP	2.00-2.95
		GW	2.0	67.6	30.2	2.2	NP	NP	NP	2.95-4.00
CR-38	Arcilla delgada arenosa	CL	12.5	2.5	22.3	75.2	37	21	16	0.50-1.25
	Arcilla gruesa	CH	13.9	0.0	5.2	94.8	54	21	33	1.25-1.95
	Limo arenoso	ML	6.3	0.0	40.5	59.5	31	NP	NP	2.20-3.10
	Arcilla delgada arenosa	CL	14.3	0.0	19.4	80.6	36	20	16	3.10-4.00
CR-39	Arena arcillo limosa	SC-SM	3.5	2.6	52.9	44.6	19	13	6	0.20-1.35
	Arena bien gradada con grava	SW	0.9	39.0	57.9	3.0	NP	NP	NP	2.20-2.70
	Arena mal gradada	SP	1.0	1.5	95.5	3.0	NP	NP	NP	2.70-3.10
	Arena limosa	SM	4.7	0.0	59.7	40.3	23	NP	NP	3.10-4.10
CR-43	Arcilla inorgánica de mediana plasticidad	CL	19.5	0.4	23.8	75.8	32	26	6	0.00 – 0.40
	Arenas finas limosas	SM	11.4	1.2	85.0	13.8	----	----	----	0.40 – 1.60
CR-44	Arenas finas limosas	SM	11.4	0.0	87.6	12.4	----	----	----	0.30 – 1.50
	Arenas medias limosas gravosas	SM	2.0	23.6	68.4	8.0	----	----	----	1.50 – 4.0
CR-46	Arenas finas limosas no plásticas	SM	11.8	0.2	71.9	27.9	----	----	----	0.00 – 1.50
	Arenas medias gravosas	SP	2.8	31.0	66.1	2.9	----	----	----	1.50 – 4.00
CR-49	Arenas finas limosas	SM	6.0	0.0	84.4	15.6	----	----	----	0.20 – 1.60
CR-51	Arenas medias gravosas	SP	3.9	55.6	40.3	4.1	----	----	----	1.80 – 4.00
CR-57	Arcillas inorgánicas de mediana plasticidad	CL	11.3	1.5	35.7	62.8	33	25	8	0.00 – 0.60
	Arenas medias limosas gravosas	SM	4.4	35.2	55.9	8.9	----	----	----	0.60 – 4.00
CR-74	Arena limosa	SM	2.2	14.3	64.4	21.3	20	NP	NP	0.60-1.90
	Arcilla limosa	CL-ML	7.6	1.2	45.9	52.9	24	18	7	1.90-2.90
	Arena pobremente gradada	SP	0.8	30.2	67.1	2.7	NP	NP	NP	2.90-4.50
CR-75	Arena limosa	SM	2.2	7.0	71.5	21.6	NP	NP	NP	0.00-1.10
CR-76	Arcilla limosa	CL-ML	5.8	4.3	43.5	52.2	24	18	6	0.00-1.10
	Arena limosa	SM	9.5	1.6	64.2	34.2	NP	NP	NP	2.10-3.00
	Arena pobremente gradada	SP-SM	2.3	30.5	60.8	8.8	NP	NP	NP	3.00-4.50
CR-77	Arena limosa con arcilla	SM-SC	2.4	6.0	46.5	47.5	22	16	6	0.00-1.30
	Arena bien gradada	SW	0.5	20.8	78.4	0.9	NP	NP	NP	1.30-1.80
	Arena bien gradada con limo	SW-SM	1.0	46.0	48.9	5.2	NP	NP	NP	1.80-2.80
	Arena limosa	SM	3.0	0.0	58.6	41.4	NP	NP	NP	2.80-3.40
	Arena bien gradada con limo	SW-SM	1.3	30.4	62.1	7.5	NP	NP	NP	3.40-4.50
CR-82	Arena limosa	SM	3.1	0.0	77.3	22.7	NP	NP	NP	1.30 - 1.45
		SM	4.1	0.8	67.3	31.9	NP	NP	NP	1.45 - 2.30
	Arena mal gradada con limo	SP-SM	1.6	0.5	89.5	9.9	NP	NP	NP	2.30 - 2.45
CR-83	Arena bien gradada	SW	1.1	8.1	87.2	4.7	NP	NP	NP	2.45 - 3.00
	Arena delgada arenosa	CL	7.0	0.0	35.4	64.6	26	17	9	0.20 - 1.45

REC.	NOMBRE DEL GRUPO	SUCS	w (%)	G (%)	A (%)	F (%)	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	PROF. (m)
	Arena bien gradada	SW	0.9	13.9	83.2	2.8	NP	NP	NP	1.45 - 1.60
	Arena limosa	SM	2.1	13.9	66.3	19.8	NP	NP	NP	1.60 - 1.70
	Limo arenoso	ML	3.8	0.0	35.4	64.6	21	NP	NP	1.70 - 2.50
CR-84	Arcilla delgada con arena	CL	17.8	0.0	16.8	83.2	33	21	12	0.30 - 1.85
	Limo arenoso	ML	12.8	1.1	43.1	55.8	22	19	3	1.85 - 2.50
CR-85	Arcilla delgada	CL	17.8	0.0	3.1	96.9	42	24	18	0.15 - 0.80
		CL	19.3	0.0	0.5	99.5	41	25	16	0.80 - 1.00
	Arcilla gruesa	CH	27.1	0.0	12.4	87.6	52	26	26	1.00 - 2.00
	Grava limosa con arena	GM	7.8	42.4	38.4	19.2	23	NP	NP	2.00 - 3.00
CR-86	Arcilla delgada arenosa	CL	3.6	2.3	34.1	63.6	26	16	10	0.00 - 1.20
	Grava mal gradada con arena	GP	0.9	59.9	37.2	3.0	NP	NP	NP	1.20 - 2.00
CR-89	Limo de baja plasticidad con arena	ML	20.3	0.0	15.2	84.8	37	25	12	1.20 - 3.00
CR-90	Grava bien gradada con limo y arena	GW-GM	5.0	67.0	27.3	5.7	----	NP	NP	3.00 - 4.30
CR-91	Limo orgánico	OL	40.5	0.0	8.3	91.7	46	30	16	2.00 - 3.60
CR-92	Grava limosa con arena	GM	8.5	51.7	35.7	12.6	----	NP	NP	3.70 - 4.40
CR-93	Arena pobremente gradada con limo y grava	SP-SM	15.2	35.1	58.5	6.4	----	NP	NP	4.40 - 4.60
CR-94	Arcilla de baja plasticidad con arena con materia orgánica	OL	48.8	0.0	7.2	92.8	31	22	9	2.30 - 4.70
CR-95	Limo arenoso orgánico	OL	52.2	0.0	2.1	97.9	48	31	17	3.30 - 4.80
CR-96	Limo arenoso orgánico de baja plasticidad	OL	29.9	0.0	33.0	67.0	----	NP	NP	2.40 - 5.00
CR-97	Limo arenoso	ML	6.5	0.0	40.7	59.3	----	NP	NP	1.80 - 2.00
	Grava bien gradada	GW	2.2	69.9	26.2	4.0	----	NP	NP	3.00 - 4.00
CR-98	Arena limosa	SM	5.0	0.0	51.7	48.3	22	NP	NP	0.20 - 1.40
	Grava pobremente gradada con arena	GP	0.9	73.9	24.8	1.3	----	NP	NP	2.00 - 5.00
CR-99	Grava pobremente gradada con arena	GP	1.7	75.9	21.7	2.4	----	NP	NP	4.00 - 4.80
		GP	2.1	75.1	23.4	1.6	----	NP	NP	4.80 - 6.50
	Grava bien gradada con arena	GW	2.0	66.1	29.8	4.1	----	NP	NP	6.50 - 9.00
CR-101	Grava pobremente gradada con limo y arena	GP - GM	1.2	54.2	40.8	5.0	----	NP	NP	3.00 - 3.50
CR-102	Grava pobremente gradada con arena	GP	2.0	71.6	26.7	1.7	----	NP	NP	4.20 - 6.00
		GP	2.0	78.5	20.3	1.2	----	NP	NP	6.00 - 8.00
CR-103	Grava bien gradada con arena	GW	0.9	71.0	27.7	1.3	----	NP	NP	2.50 - 3.50
CR-105	Grava pobremente gradada con arena	GP	0.8	76.0	22.9	1.1	----	NP	NP	2.00 - 5.00
	Grava pobremente gradada con arena	GP	1.9	73.6	25.1	1.3	----	NP	NP	5.00 - 9.00
CR-106	Grava pobremente gradada con arena	GP	0.8	73.3	24.6	2.1	----	NP	NP	2.90 - 3.20
CR-107	Grava pobremente gradada con arena	GP	2.8	72.6	23.8	3.6	----	NP	NP	1.70 - 5.00
CR-108	Arena limosa de consistencia media	SM	5.8	0.0	60.7	39.3	----	NP	NP	0.80 - 1.80
	Grava pobremente gradada con arena	GP	1.2	75.7	21.8	2.5	----	NP	NP	3.00 - 5.00

REC.	NOMBRE DEL GRUPO	SUCS	w (%)	G (%)	A (%)	F (%)	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	PROF. (m)
CR-109	Limo arenoso de consistencia media a firme	ML	8.3	0.0	13.0	87.0	26	NP	NP	1.20 - 2.40
	Grava pobremente gradada con arena	GP	0.8	77.1	21.7	1.2	----	NP	NP	2.40 - 5.00
CR-111	Grava pobremente gradada con arena	GP	2.2	71.9	25.9	2.2	----	NP	NP	3.00 - 3.50
CR-112	Arena limosa	SM	1.9	0.0	83.0	17.0	----	NP	NP	1.50 - 1.80
CR-113	Grava bien gradada con arena	GW	2.1	69.0	27.7	3.3	----	NP	NP	3.00 - 3.50
CR-114	Grava pobremente gradada de compacidad media	GP	0.3	86.0	13.3	0.7	----	NP	NP	1.70 - 4.50
CR-115	Grava pobremente gradada con limo y arena	GP - GM	0.2	62.4	32.4	5.2	----	NP	NP	2.00 - 3.50
CR-116	Grava pobremente gradada con arena	GP	1.5	72.9	26.3	0.9	----	NP	NP	3.00 - 4.50
	Grava pobremente gradada con arena	GP	4.1	76.5	21.6	1.9	----	NP	NP	6.00 - 7.50
	Grava bien gradada con arena	GW	4.1	68.4	29.8	1.8	----	NP	NP	7.50 - 9.00
CR-117	Grava pobremente gradada con arena	SP	2.2	32.3	63.3	4.4	----	NP	NP	3.00 - 3.60
CR-119	Grava pobremente gradada con arena	GP	0.8	73.1	25.9	1.0	----	NP	NP	3.60 - 4.00
CR-121	Grava pobremente gradada con arena	GP	0.8	72.8	25.8	1.4	----	NP	NP	3.20 - 3.60
CR-123	Grava bien gradada con arena	GW	1.2	69.7	28.6	1.7	----	NP	NP	3.00 - 3.50
CR-124	Grava pobremente gradada con arena	GP	1.2	73.6	25.1	1.3	----	NP	NP	1.20 - 5.50
CR-125	Limo arenoso	ML	22.0	0.0	7.5	92.5	36	26	10	2.00 - 3.00
CR-126	Grava pobremente gradada con limo y arena	GP - GM	1.8	65.3	29.2	5.5	----	NP	NP	2.50 - 3.00
CR-127	Grava pobremente gradada con arena	GP	2.1	72.5	23.6	3.9	----	NP	NP	1.00 - 5.00
CR-128	Grava pobremente gradada con arena	GP	2.0	74.0	24.3	1.8	----	NP	NP	2.00 - 5.00
CR-129	Grava pobremente gradada con arena	GP	1.9	67.8	30.4	1.8	----	NP	NP	3.50 - 4.00
CR-130	Limo de baja plasticidad con arena	ML	7.7	0.0	21.9	78.1	22	20	2	1.50 - 2.00
	Grava bien gradada con limo y arena	GW - GM	3.3	62.6	25.7	11.7	----	NP	NP	3.00 - 4.00
CR-131	Limo arenoso	ML	4.7	0.0	47.8	52.2	----	NP	NP	1.00 - 1.60
CR-134	Grava bien gradada con arena	GW	0.6	71.6	26.4	2.0	----	NP	NP	3.20 - 3.50
CR-135	Arcilla limo arenoso	CL - ML	7.8	0.0	39.9	60.1	25	20	5	0.50 - 1.00
CR-136	Grava bien gradada con arena	GW	1.2	70.1	27.4	2.5	----	NP	NP	4.00 - 5.50
	Grava bien gradada con arena	GW	1.7	68.9	28.7	2.4	----	NP	NP	5.50 - 9.00
CR-138	Grava pobremente gradada con arena	GP	0.8	66.5	31.7	1.8	----	NP	NP	3.00 - 3.50

REC.	NOMBRE DEL GRUPO	SUCS	w (%)	G (%)	A (%)	F (%)	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	PROF. (m)
CR-140	Grava pobremente gradada con arena	GP	3.5	74.8	23.0	2.2	----	NP	NP	4.00 - 5.00
CR-142	Arena limosa	SM	2.1	0.0	54.4	45.6	----	NP	NP	1.50 - 2.00
	Grava bien gradada con arena	GW	0.7	68.2	28.2	3.6	----	NP	NP	3.00 - 3.50
CR-143	Grava pobremente gradada con arena	SM	1.4	0.0	80.4	19.6	----	NP	NP	1.50 - 1.90
CR-144	Grava bien gradada con arena	ML	2.9	0.0	32.9	67.1	22	NP	NP	1.00 - 1.15
CR-146	Grava pobremente gradada con arena	GP	1.4	58.5	36.7	4.8	----	NP	NP	2.50 - 3.50
CR-147	Grava pobremente gradada con arena	GP	0.3	86.7	12.3	1.0	----	NP	NP	0.90 - 3.50
CR-148	Grava pobremente gradada con arena	GP	0.8	77.7	20.5	1.8	----	NP	NP	3.00 - 4.00
CR-149	Grava pobremente gradada con arena	GP	0.7	62.3	37.3	0.4	----	NP	NP	3.00 - 3.50
CR-150	Arcilla arenosa	CL	10.0	0.0	30.0	70.0	32	22	10	1.00 - 1.40
CR-151	Limo arenoso	ML	9.7	0.0	9.9	90.1	24	NP	NP	1.80 - 2.20

Anexo 2: Ensayos Estándar de Mecánica de Suelos – SPT

Resumen de los Resultados de los Ensayos Estándar de Mecánica de Suelos – SPT Recopilados en el Distrito de Comas.

RECOP.	NOMBRE DEL GRUPO	SUCS	w (%)	G (%)	A (%)	F (%)	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	PROF. (m)
SPTR-07	Limo arenoso	ML	2.4	0	37.1	62.9	----	NP	NP	1.30 - 1.45
	Arena limosa	SM	7.4	0	50	50	----	NP	NP	1.45 - 2.10
	Grava limosa con arena	GM	5.8	32.2	28.5	39.3	----	NP	NP	2.40 - 2.55
SPTR-08	Arena limosa	SM	5.8	0	64.8	35.2	----	NP	NP	1.30 - 1.45
SPTR-09	Arcilla de baja plasticidad con arena	CL	8.4	0	21.9	78.1	28	20	8	1.00 - 1.35
	Grava pobremente gradada con arcilla	GP - GC	2.5	77.4	15	7.7	23	19	4	1.35 - 1.80
SPTR-10	Arcilla arenosa de baja plasticidad	CL	17.4	0.0	38.1	61.9	28	20	8	1.00 - 1.70

Anexo 3: Ensayos Especiales de Mecánica de Suelos - Consolidación U

Resultados de los Ensayos Especiales de Mecánica de Suelos - Ensayos de Consolidación Unidimensional Recopilados

RECOP.	TIPO DE MUESTRA	PROF. (m)	Presión Consolidación (kg/cm ²)	e	Cc	Cs
CR-91	Inalterado	2.00 – 3.60	0.89	1.31	0.41	0.05
CR-95	Remoldeado	3.30 – 4.80	0.96	1.26	0.38	0.05

Anexo 4: Ensayos Especiales de Mecánica de Suelos - Compresión U

Resultados de los Ensayos Especiales de Mecánica de Suelos - Ensayos de Compresión Unidimensional Recopilados

RECOP.	TIPO DE MUESTRA	PROF. (m)	qu (kg/cm ²)	
			Espécimen 1	Espécimen 2
CR-91	Inalterado	2.00 – 3.60	0.64	0.52
CR-95	Remoldeado	3.30 – 4.80	0.12	0.13

Anexo 5: Ensayos Especiales de Mecánica de Suelos - CD

Resultados de los Ensayos Especiales de Mecánica de Suelos - Ensayos de Corte Directo Recopilados

RECOP.	PROF. (m)	w (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)	DENSIDAD HUMEDA (g/cm ³)	CORTE DIRECTO	
					f (°)	c (kg/cm ²)
CR-57	0.60 - 4.00	4.40	----	2.05	32.0	----
CR-74	1.90 - 2.90	7.60	1.30	1.40	32.0	0.10
	2.90 - 4.50	1.18	1.89	1.91	41.2	0.10
CR-76	3.00 - 4.50	3.88	1.78	1.85	34.5	0.00
CR-77	1.80 - 2.80	1.02	1.98	2.00	41.5	0.00
	2.80 - 3.40	3.01	1.51	1.55	33.5	0.00
CR-84	1.85-2.50	12.10	----	1.74	26.5	0.05
CR-89	1.20-3.00	20.30	1.50	1.80	26.0	0.13
CR-90	4.40-4.60	15.17	16.18	----	30.9	0.10
CR-99	6.50 - 9.00	18.49	----	18.49	31.2	0.03
CR-105	5.00 - 9.00	18.50	----	18.50	33.6	0.03
CR-108	3.00 - 5.00	20.85	----	20.85	33.1	0.04
CR-116	6.00 - 7.50	20.07	----	20.07	38.7	0.03
CR-125	2.00 - 3.00	17.95	----	17.95	24.2	0.10
CR-126	2.50 - 3.00	17.98	----	17.98	31.3	0.02
CR-130	3.00 - 4.00	20.35	----	20.35	33.8	0.01
CR-136	5.50 - 9.00	18.46	----	18.46	32.1	0.05
CR-146	2.50 - 3.50	18.40	----	18.40	33.0	0.03
CR-151	1.80 - 2.20	18.15	----	18.15	25.1	0.08
SPTR-10	1.00 - 1.70	18.84	----	18.84	24.4	0.15

Anexo 6: Ensayos Especiales de Mecánica de Suelos - Químicos.

Resultados de los Ensayos Especiales de Mecánica de Suelos - Ensayos de Elementos Químicos Recopilados.

RECOP.	pH	SULFATOS (ppm)	CLORUROS (ppm)	SST (ppm)	PROF. (m)
CR-01	----	1000.0	----	----	----
CR-02	----	33.8	424.0	----	0.90 - 1.00
CR-03	----	381.1	140.0	----	3.80 - 4.00
CR-04	----	10.0	----	----	----
CR-31	----	51.0	----	----	----
CR-35	----	34.0	----	----	1.50 - 1.70

RECOP.	pH	SULFATOS (ppm)	CLORUROS (ppm)	SST (ppm)	PROF. (m)
CR-40	----	904.3	----	----	0.50 - 0.70
CR-41	----	68.1	----	----	----
CR-72	----	96.5	----	----	1.30 - 1.50
CR-73	----	13.7	----	307.2	----
CR-74	7.56	338.0	78.1	710.4	2.90 - 3.50
CR-76	7.57	412.0	198.8	812.8	3.00 - 4.50
CR-77	7.50	310.0	134.9	761.6	1.80 - 2.80
CR-89	----	53.8	59.6	336.0	1.20 - 3.00
CR-91	----	749.3	160.4	1964.0	2.00 - 3.60
CR-94	7.00	720.5	134.8	1754.0	4.50 - N.F.
CR-102	----	71.6	15.1	223.0	4.20 - 6.00
CR-108	----	169.6	46.3	494.2	1.80 - 3.00
CR-117	----	198.8	36.7	538.2	2.00
CR-121	----	153.5	20.4	320.0	3.20 - 3.60
CR-125	----	245.0	63.9	730.0	2.50
CR-135	----	32.7	10.5	115.8	3.80
CR-139	----	48.0	14.2	160.0	2.80
CR-146	----	352.5	56.0	880.8	1.50
CR-148	----	140.1	12.1	310.0	3.50
CR-149	----	44.2	16.3	168.9	2.00
SPTR-05	7.81	425.0	127.8	953.6	3.50

Anexo 7: Microtremores Recopilados

Microtremores Recopilados con el valor de su periodo fundamental obtenido.

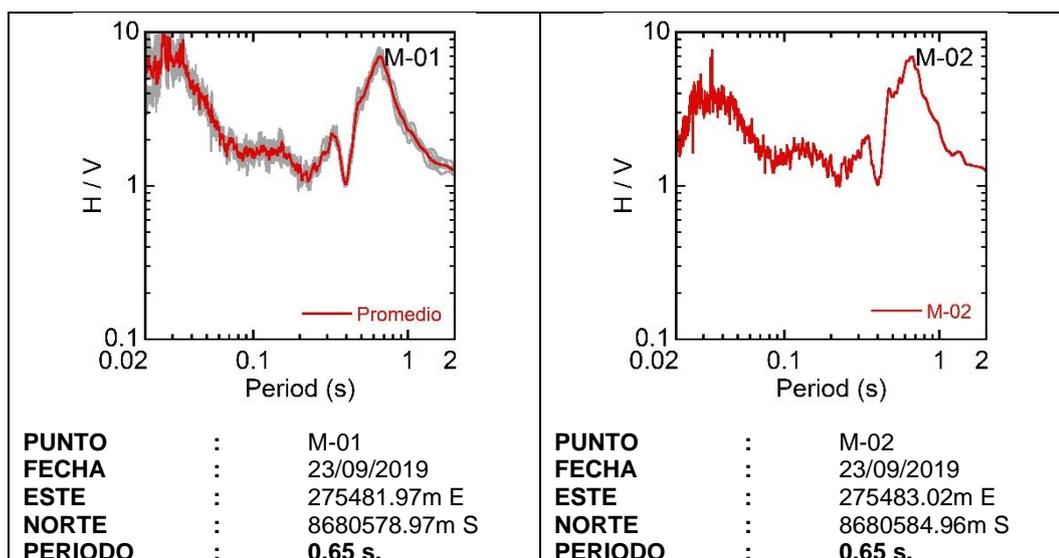
CÓD.	COORDENADAS UTM		1er PF	2do PF	CÓD.	COORDENADAS UTM		1er PF	2do PF
	ESTE (m)	NORTE (m)				ESTE (m)	NORTE (m)		
MR-01	276108.63	8675684.38	0.08	-	MR-44	274399.21	8681497.59	0.06	0.54
MR-02	276307.55	8676467.54	0.12	-	MR-45	274533.72	8682211.37	0.07	0.60
MR-03	277101.53	8676798.22	0.10	-	MR-46	274960.40	8681931.47	0.10	0.54
MR-04	277588.78	8677208.55	0.20	-	MR-47	275839.45	8682730.25	0.10	0.50
MR-05	278002.64	8677393.11	0.10	-	MR-48	275355.07	8683172.57	0.09	0.45
MR-06	277313.09	8677619.09	0.10	-	MR-49	275896.75	8683893.42	0.14	0.57
MR-07	276688.65	8677248.63	0.20	-	MR-50	276020.10	8683275.43	0.10	0.70
MR-08	276795.26	8677882.27	0.15	-	MR-51	276526.16	8684149.98	0.10	0.55
MR-09	276889.40	8678613.11	0.17	-	MR-52	276505.90	8684679.47	0.10	0.52
MR-10	278740.37	8678744.97	0.10	-	MR-53	276851.81	8683705.18	0.05	0.85
MR-11	278014.02	8678967.01	0.15	-	MR-54	277791.25	8683712.09	0.08	0.68
MR-12	277352.70	8679090.62	0.18	-	MR-55	277609.04	8683398.73	0.14	0.60
MR-13	277617.45	8679408.45	0.17	-	MR-56	276691.87	8681877.93	0.05	0.30
MR-14	277021.63	8679366.72	0.16	-	MR-57	275824.93	8681847.35	0.14	0.35
MR-15	277668.91	8680398.30	0.10	-	MR-58	276322.65	8680973.04	0.07	0.42
MR-16	278011.41	8681061.16	0.10	-	MR-59	275386.94	8677769.24	0.05	0.83
MR-17	278304.83	8681815.93	0.16	-	MR-60	275501.63	8678313.94	0.03	0.58
MR-18	278926.72	8682005.07	0.19	-	MR-61	274745.48	8678318.44	0.07	0.00
MR-19	279614.99	8682068.69	0.09	-	MR-62	275053.29	8679141.94	0.06	0.62
MR-20	280222.44	8682333.42	0.16	-	MR-63	275523.54	8679760.84	0.30	0.00
MR-21	280420.48	8682583.97	0.07	-	MR-64	275240.34	8680725.26	0.08	0.71
MR-22	281280.49	8682400.04	0.08	-	MR-65	275741.74	8681189.29	0.07	0.40
MR-23	278092.40	8683099.11	0.17	-	MR-66	275727.93	8675725.87	0.10	0.34
MR-24	276568.17	8682863.88	0.09	-	MR-67	275956.90	8677040.06	0.11	0.00
MR-25	276369.20	8682112.18	0.17	-	MR-68	276406.07	8678294.11	0.06	1.00
MR-26	275843.04	8676093.70	0.16	-	MR-69	276635.60	8679909.99	0.16	0.77
MR-27	275459.58	8677206.49	0.16	-	MR-70	276923.60	8680353.43	0.15	0.00

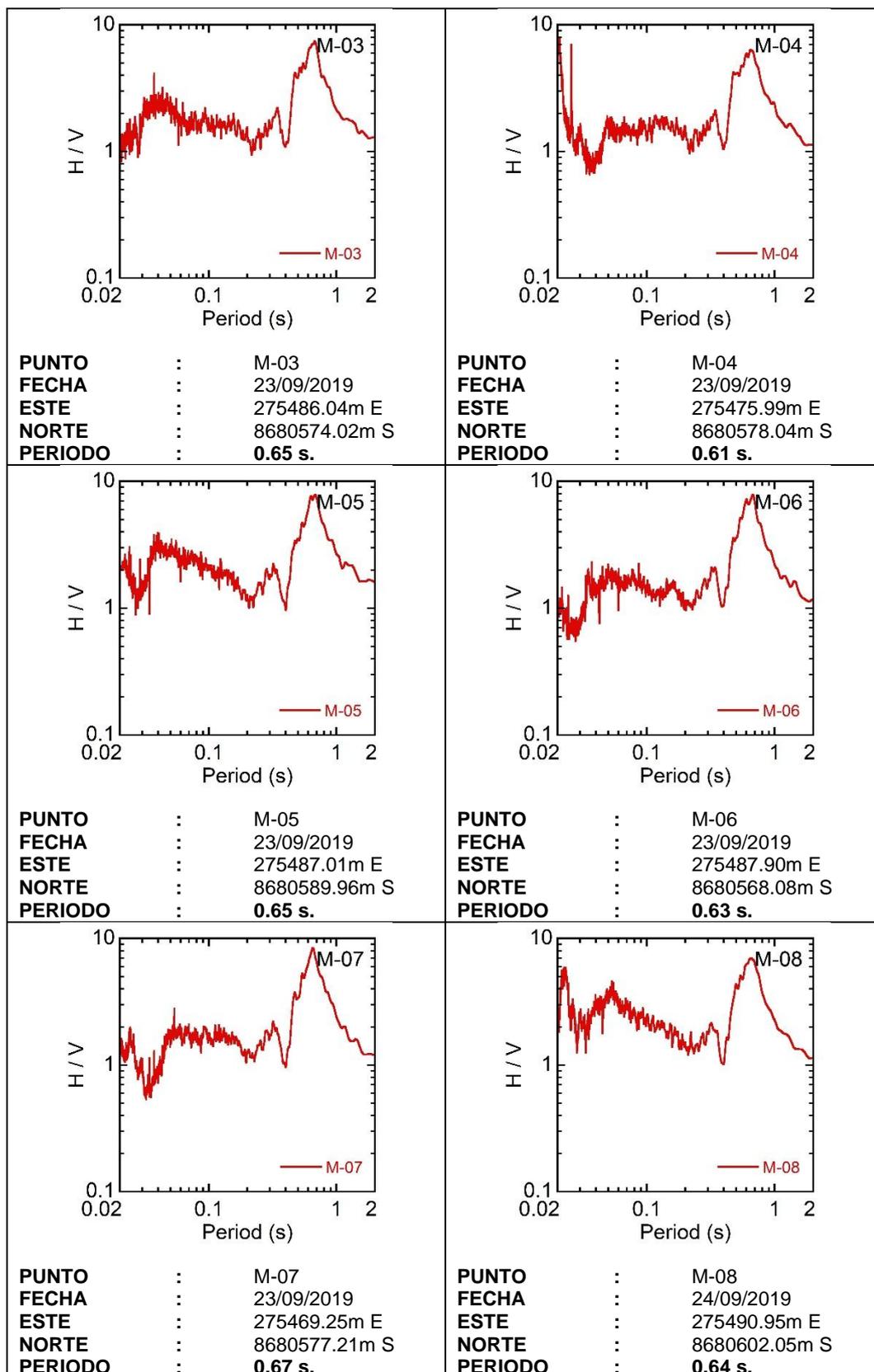
CÓD.	COORDENADAS UTM		1er PF	2do PF	CÓD.	COORDENADAS UTM		1er PF	2do PF
	ESTE (m)	NORTE (m)				ESTE (m)	NORTE (m)		
MR-28	274597.50	8678783.34	0.17	-	MR-71	277183.88	8680911.54	0.09	0.37
MR-29	274877.62	8679910.69	0.16	-	MR-72	277414.76	8682109.17	0.40	0.00
MR-30	275724.11	8679354.91	0.16	-	MR-73	277613.08	8682799.23	0.19	0.40
MR-31	276370.90	8679250.52	0.18	-	MR-74	277654.14	8677229.87	0.22	0.00
MR-32	275896.49	8678057.30	0.17	-	MR-75	276794.58	8678794.36	0.14	0.00
MR-33	276384.82	8680004.84	0.17	-	MR-76	277914.45	8681084.01	0.15	0.31
MR-34	276041.00	8680810.55	0.13	-	MR-77	277808.00	8681483.95	0.16	0.35
MR-35	276174.96	8681261.57	0.18	-	MR-78	275443.88	8680030.97	0.04	0.52
MR-36	277098.67	8680572.91	0.10	-	MR-79	275528.62	8680049.75	0.03	0.60
MR-37	277338.38	8681457.11	0.14	-	MR-80	275510.93	8680172.55	0.06	0.50
MR-38	277509.20	8682319.11	0.12	-	MR-81	275588.18	8680231.44	0.04	0.60
MR-39	275114.69	8682601.44	0.22	-	MR-82	275613.44	8680262.50	0.07	0.60
MR-40	276105.96	8682941.19	0.11	-	MR-83	275732.24	8680492.86	0.04	0.60
MR-41	276318.51	8683685.56	0.10	-	MR-84	275915.00	8680505.00	0.04	0.54
MR-42	274704.13	8681317.42	0.10	-	MR-85	275777.33	8680303.99	0.02	0.40
MR-43	274544.64	8680666.33	0.13	-	MR-86	276015.00	8680592.00	0.04	0.50

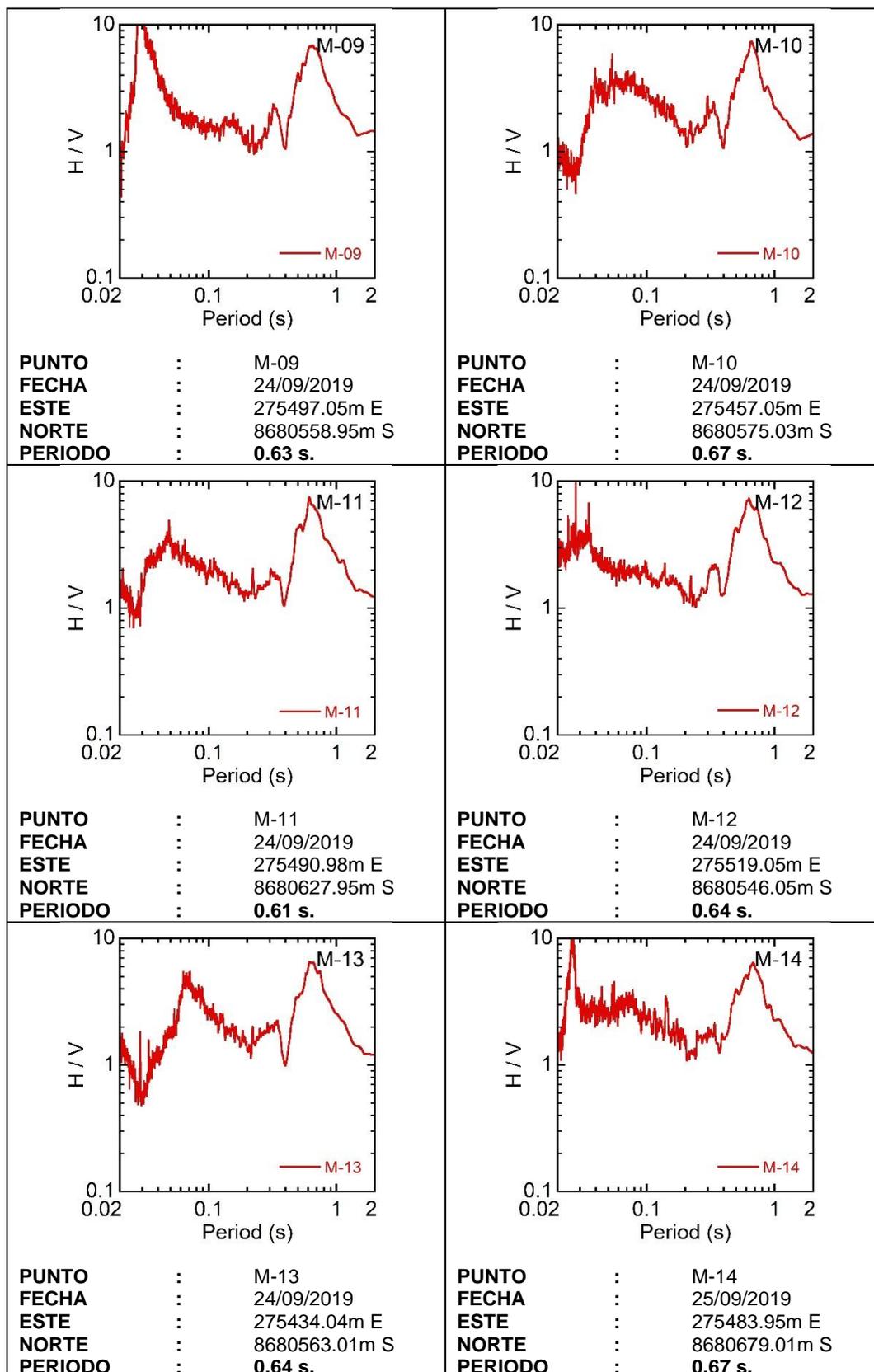
- (1) CISMID (2004). "Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de 32 Distritos de Lima y Callao - Microzonificación Sísmica del Distrito de Comas". Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. MR-01 al MR-43.
- (2) CISMID (2011). "Estudio de Microzonificación Sísmica y Vulnerabilidad en la Ciudad de Lima. Microzonificación Sísmica del Distrito de Comas". Convenio Especifico de Cooperación Interinstitucional entre el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería. MR-44 al MR-77.
- (3) CISMID (2018). "Programa de Medición Puntual de Microtrepidaciones y de Arreglo de Microtrepidaciones en el Proyecto Inmobiliario "Los Parques de Comas". ZER GEOSYSTEM PERÚ S.A.C. MR-78 al MR-86.

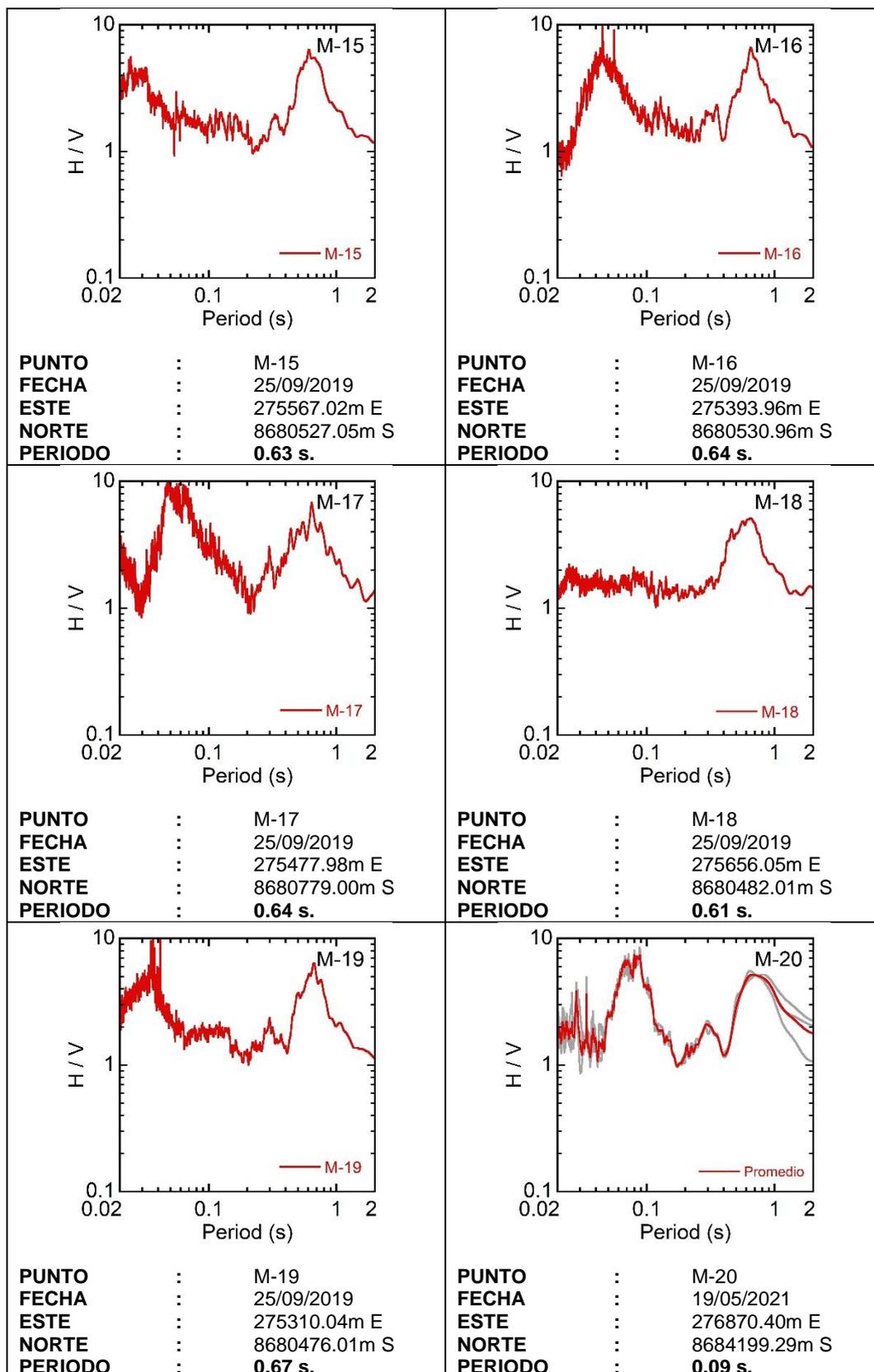
Anexo 8: Espectro H/V de Microtremores Ejecutados

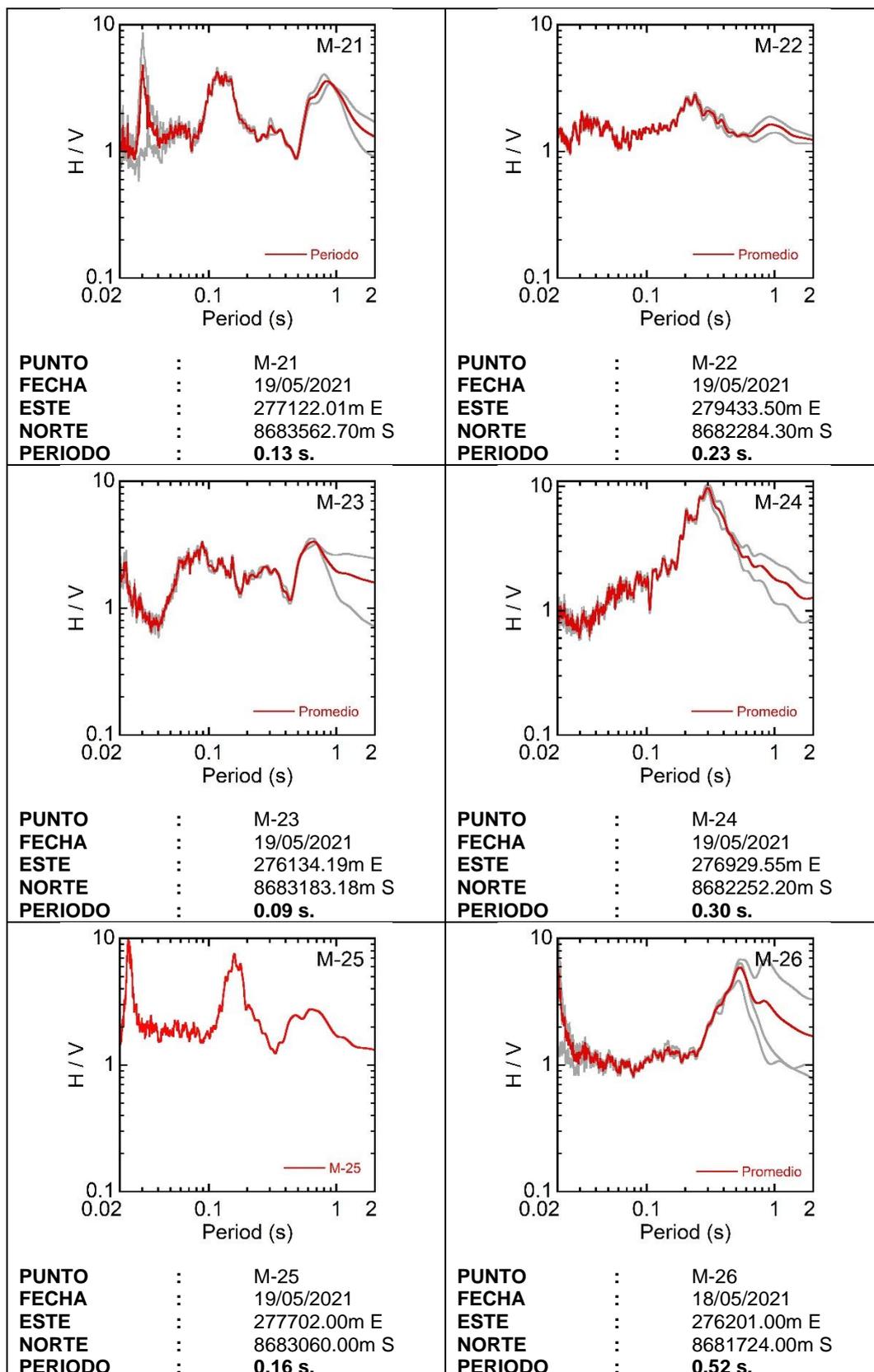
Espectro H/V de la Medición Puntual de Microtremores Ejecutados en el Distrito de Comas.

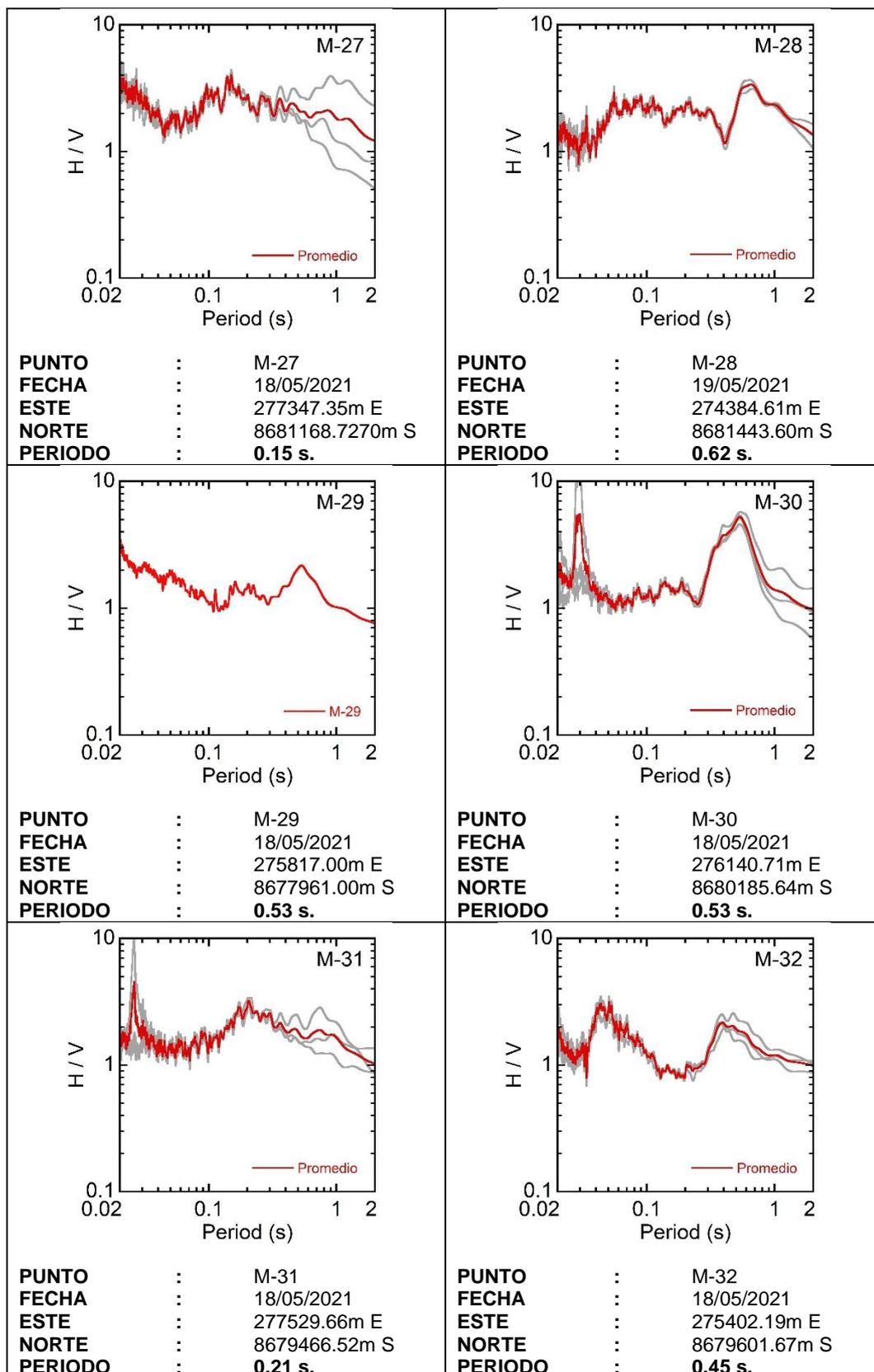


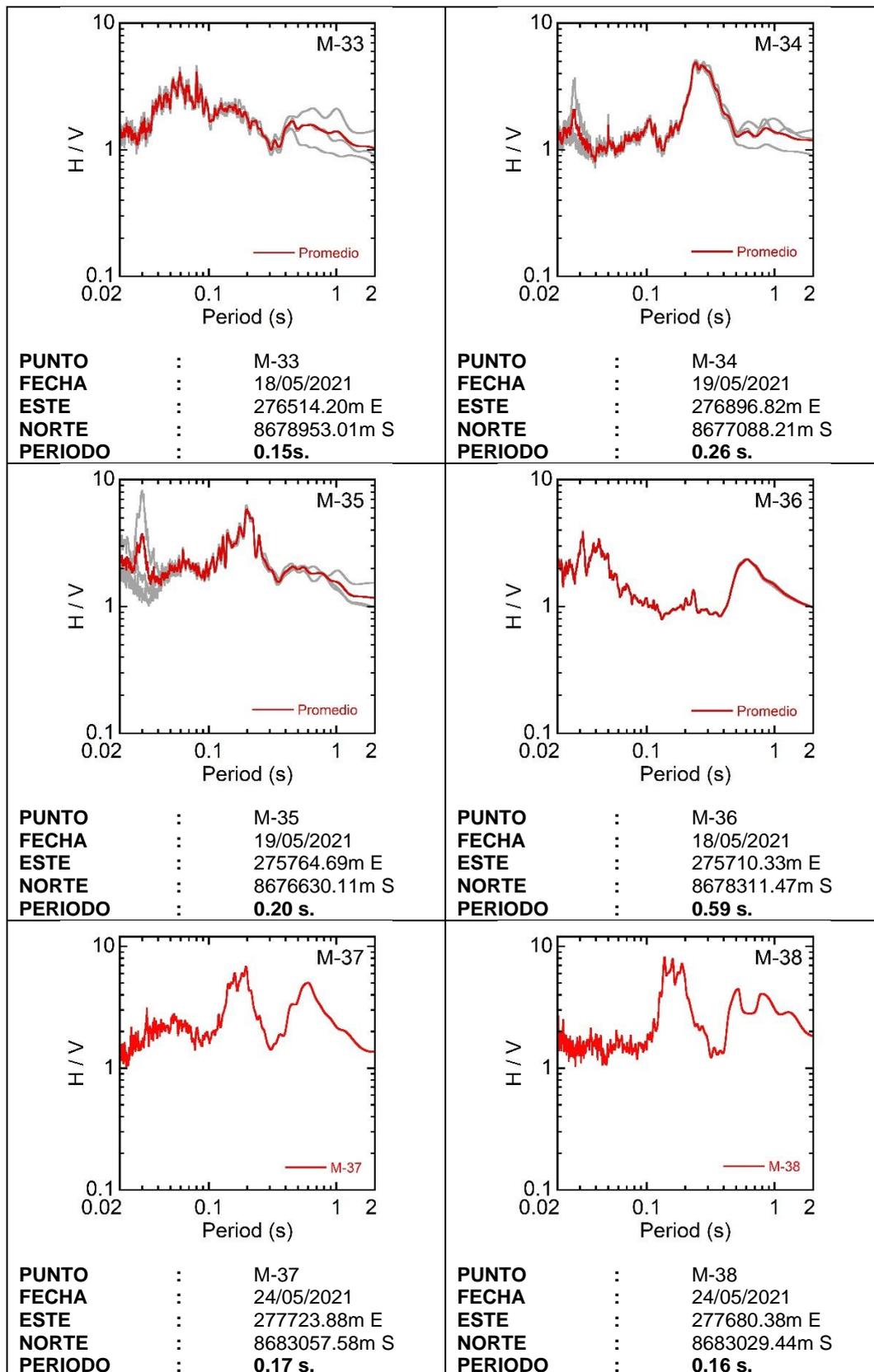


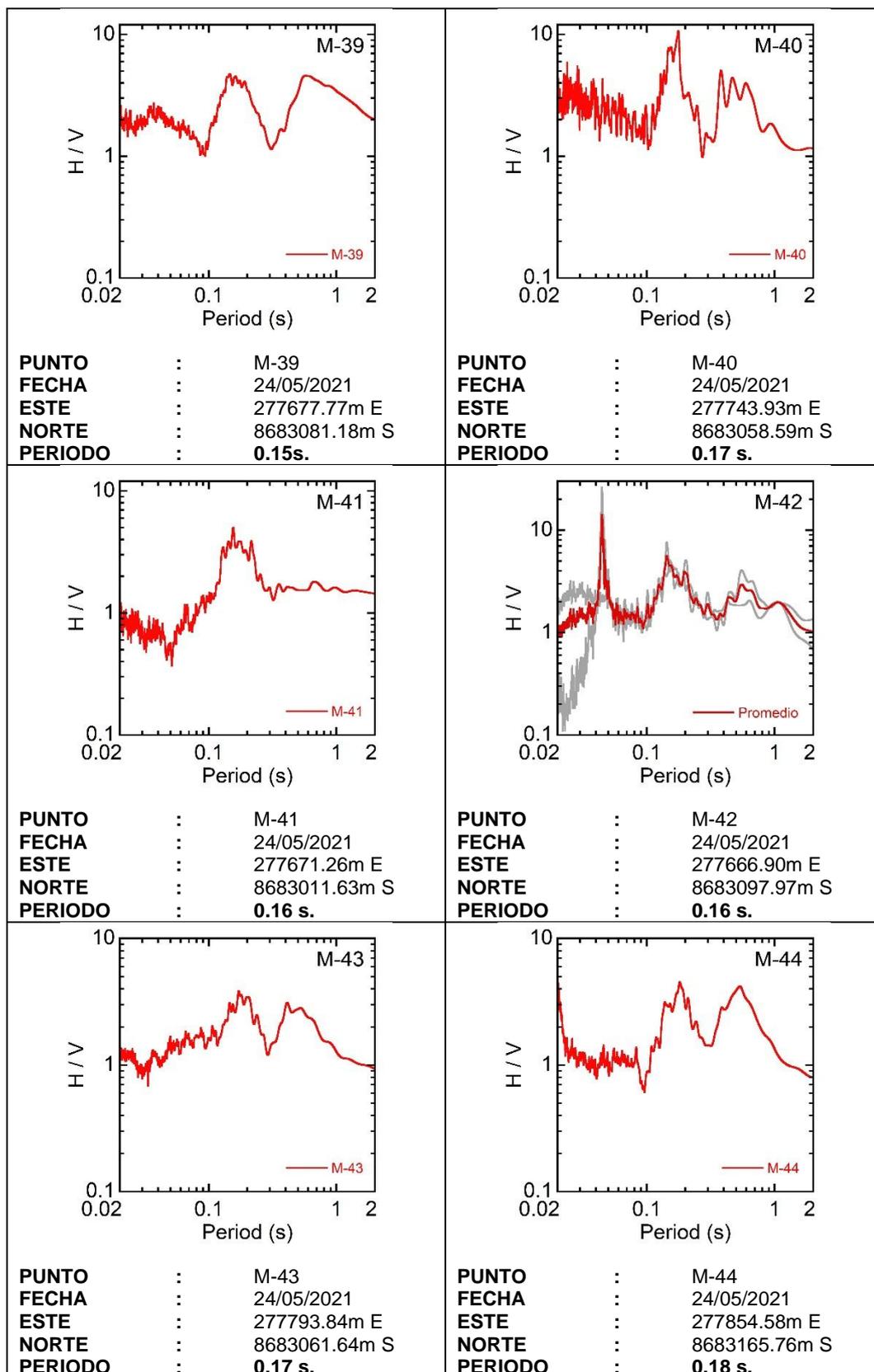


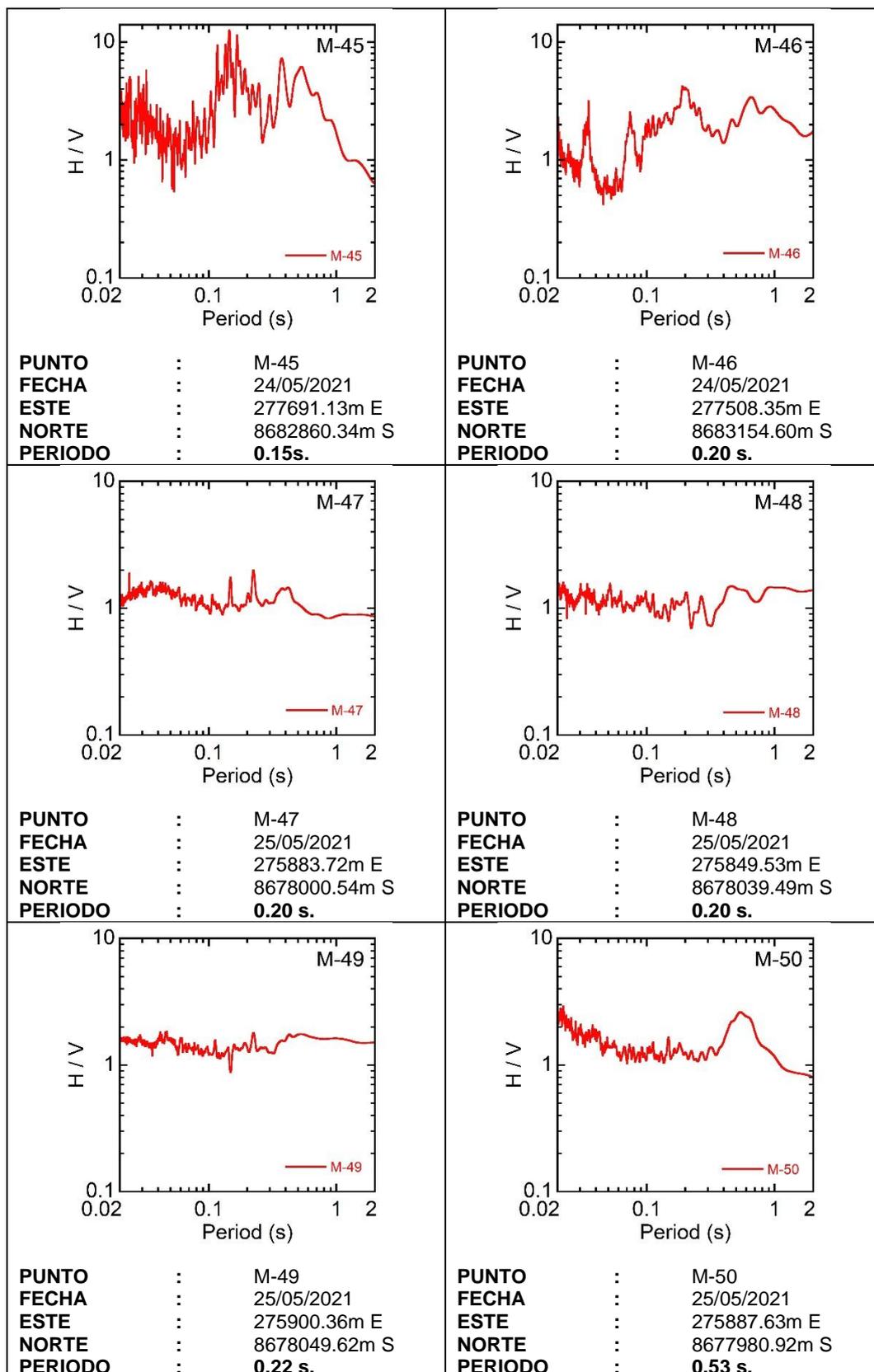


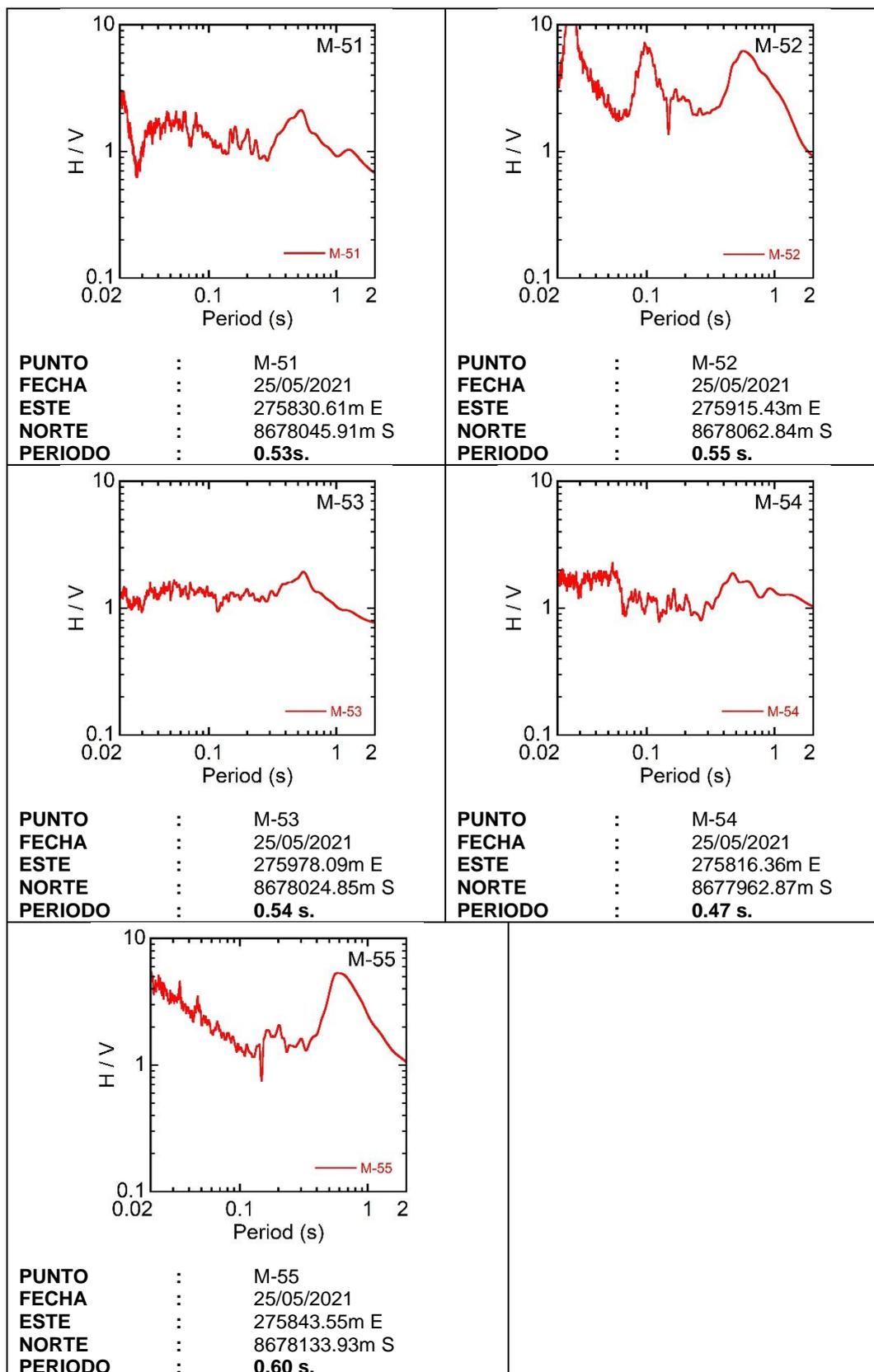












Anexo 9: Ensayo MASW Ejecutados

Ensayo MASW Ejecutados en el distrito de Comas-Curva de Dispersión y Perfil de Ondas de Corte

CÓDIGO: MASW-01

ESTE: 276545.20m E NORTE: 8684291.16m S

ELAB: A.M.V.N.

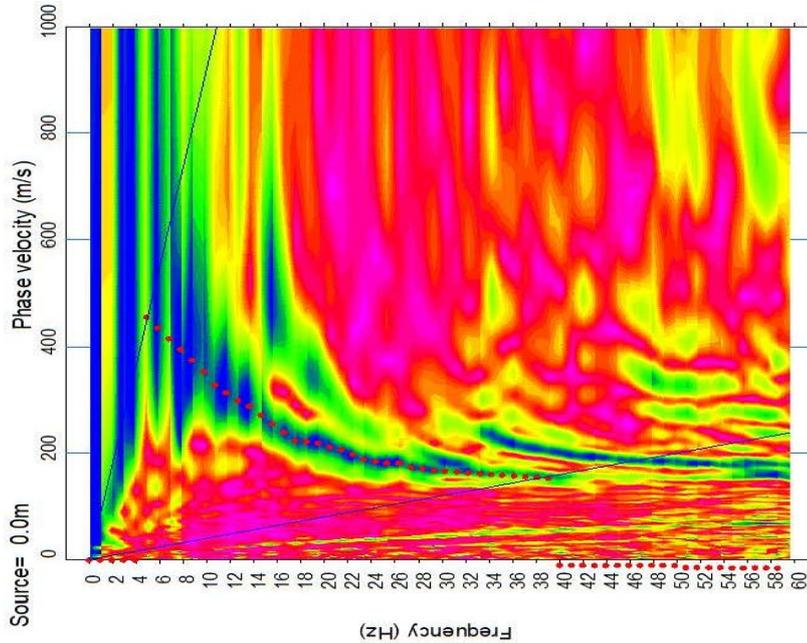
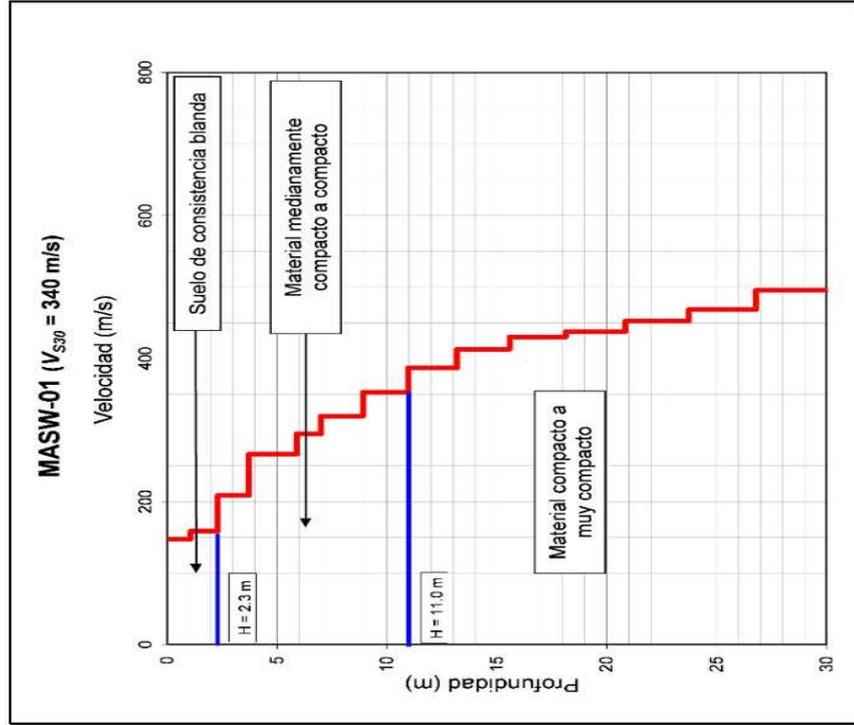
FECHA: 21/05/2021

**CUADRO
RESUMEN**

PERFIL UNIDIMENSIONAL

CURVA DE DISPERSIÓN

Prof. (m)	V_s (m/s)
0.00	147.92
1.07	158.89
2.31	208.51
3.71	266.25
5.90	295.05
7.01	319.62
8.90	319.62
10.96	353.01
13.19	386.82
15.58	413.09
18.13	430.27
20.85	437.87
23.74	452.62
26.79	468.55
30.00	495.30



(E.030-2019)	(IBC-2015)
SUELOS INTERMEDIOS – S2	SUELO RÍGIDO – D
CLASIFICACION DEL PERFIL DEL SUELO	

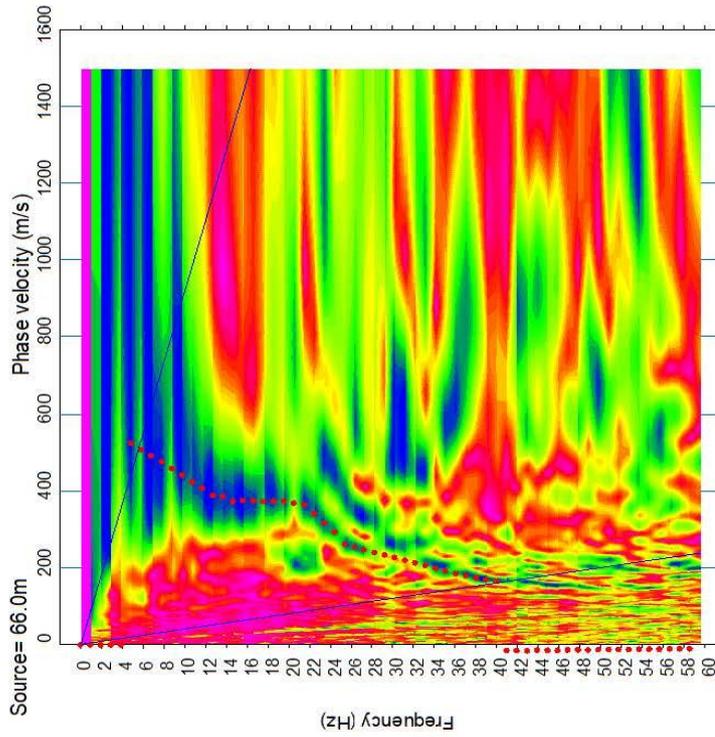
REGISTRO : sxco0101.sg2
SHOT : 01

CÓDIGO: MASW-02 FECHA: 20/05/2021

ESTE: 275926.69m E NORTE: 8683259.10m S

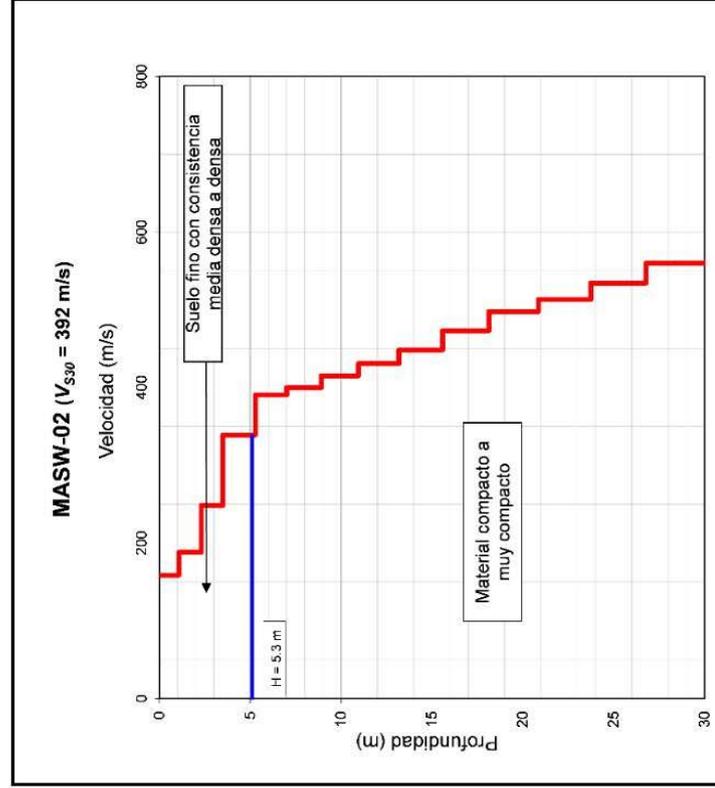
ELAB: A.M.V.N.

CURVA DE DISPERSIÓN



REGISTRO : sxco0204.sg2
SHOT : 04

PERFIL UNIDIMENSIONAL



CUADRO RESUMEN

Prof. (m)	V_s (m/s)
0.00	158.55
1.07	188.03
2.31	248.85
3.50	339.17
5.27	390.80
7.01	399.93
8.90	415.31
10.96	430.92
13.19	448.54
15.58	473.21
18.13	497.75
20.85	513.14
23.74	534.57
26.79	559.75
30.00	559.75

(E.030-2019)	(IBC-2015)
SUELOS INTERMEDIOS – S2	SUELO MUY DENSO O ROCA BLANDA – C
CLASIFICACION DEL PERFIL DEL SUELO	

ELAB: A. M. V. N.

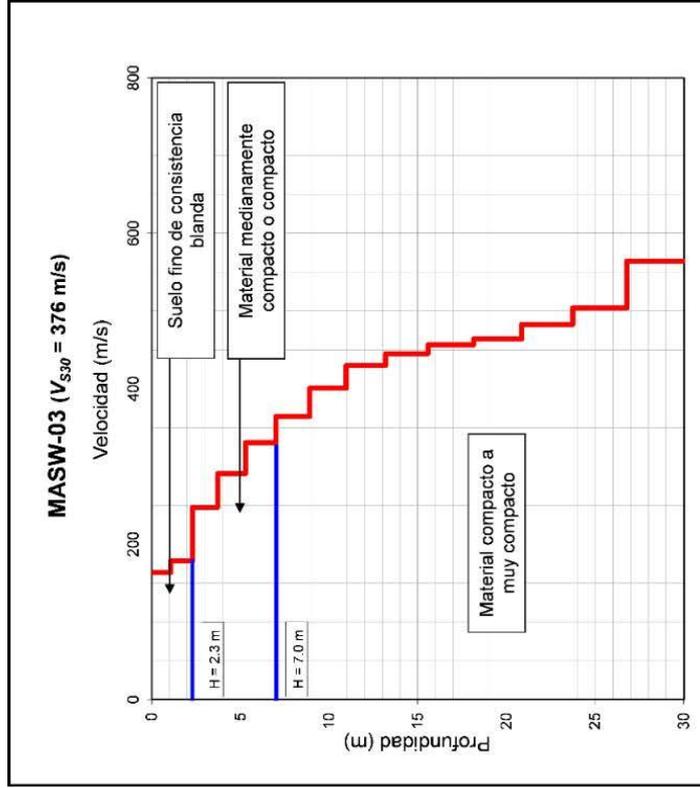
ESTE: 276801.24m E NORTE: 8682820.65m S

CÓDIGO: MASW-03 FECHA: 21/05/2021

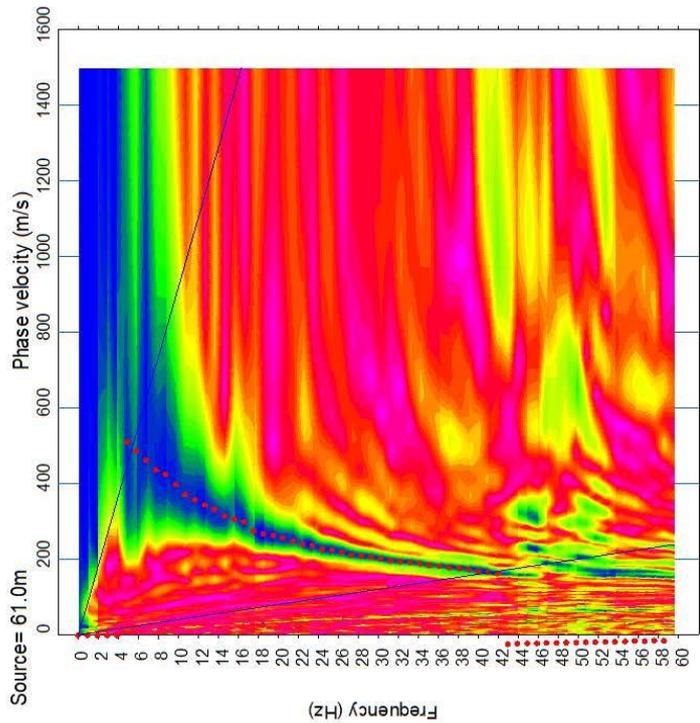
**CUADRO
RESUMEN**

Prof. (m)	V_s (m/s)
0.00	163.66
1.07	178.77
2.31	247.48
3.71	290.87
5.27	330.69
7.01	364.56
8.90	400.62
10.96	429.97
13.19	445.33
15.58	456.46
18.13	463.84
20.85	482.83
23.74	503.54
26.79	564.64
30.00	559.75

PERFIL UNIDIMENSIONAL



CURVA DE DISPERSIÓN



(E.030-2019)	(IBC-2015)
SUELOS INTERMEDIOS – S2	SUELO MUY DENSO O ROCA BLANDA – C
CLASIFICACION DEL PERFIL DEL SUELO	

REGISTRO : sxc00303.sg2
 SHOT : 03

ELAB: A. M. V. N.

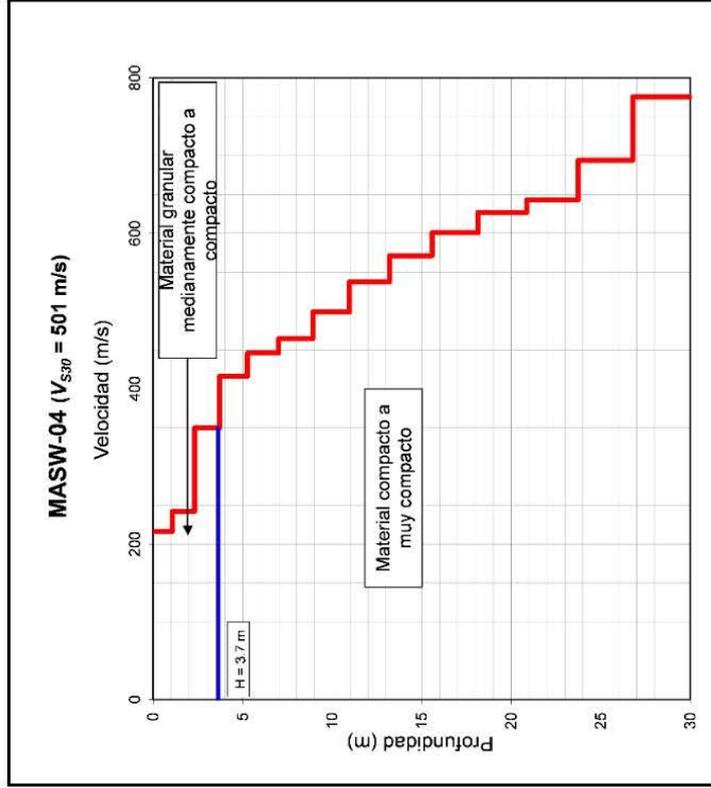
ESTE: 279238.16m E NORTE: 8682250.12m S

CÓDIGO: MASW-04 FECHA: 20/05/2021

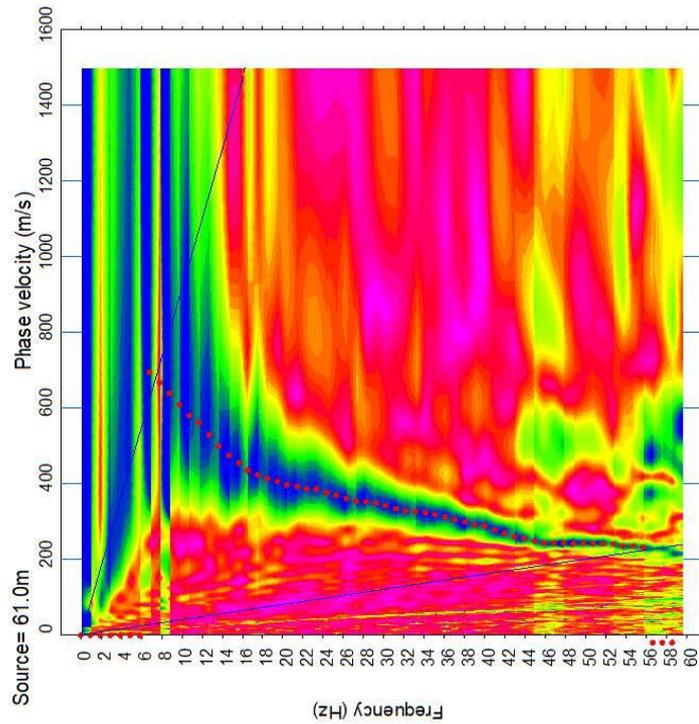
**CUADRO
RESUMEN**

Prof. (m)	V_s (m/s)
0.00	216.44
1.07	242.10
2.31	349.50
3.71	416.17
5.27	445.96
7.01	464.30
8.90	498.39
10.96	537.56
13.19	571.31
15.58	600.68
18.13	626.89
20.85	643.06
23.74	693.88
26.79	775.53
30.00	559.75

PERFIL UNIDIMENSIONAL



CURVA DE DISPERSIÓN



REGISTRO : sxc00403.sg2
SHOT : 03

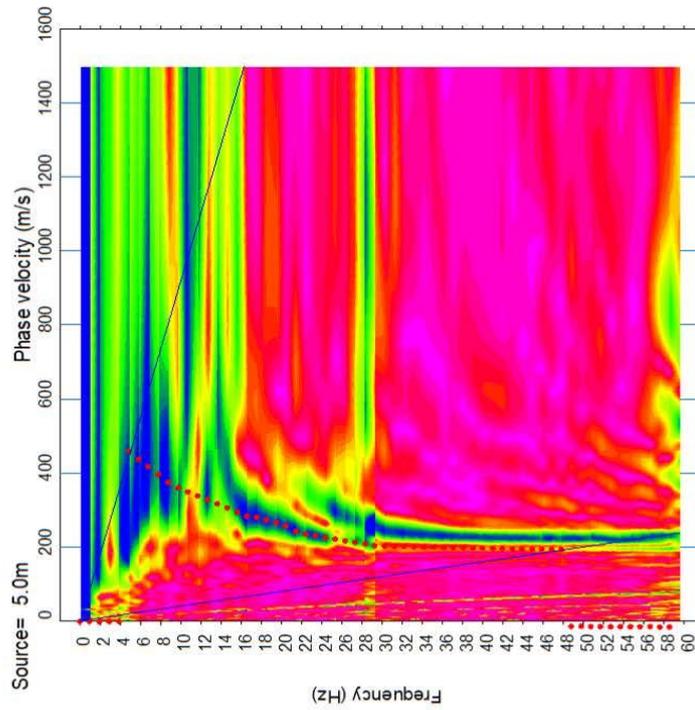
(E.030-2019) ROCA O SUELOS MUY RÍGIDOS – S1
(IBC-2015) SUELO MUY DENSO O ROCA BLANDA – C
CLASIFICACION DEL PERFIL DEL SUELO

CÓDIGO: MASW-06 FECHA: 21/05/2021

ESTE: 276370.59m E NORTE: 8680776.99m S

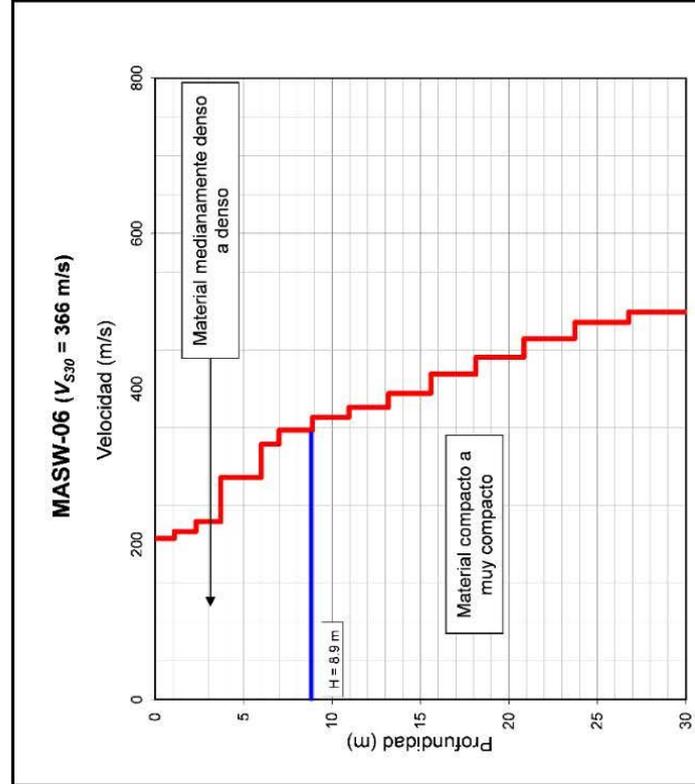
ELAB: A.M.V.N.

CURVA DE DISPERSIÓN



REGISTRO : sxco0602.sg2
SHOT : 02

PERFIL UNIDIMENSIONAL



Prof. (m)	V_s (m/s)
0.00	207.24
1.07	216.24
2.31	229.16
3.71	285.94
6.00	328.89
7.01	346.73
8.90	363.60
10.96	376.21
13.19	394.19
15.58	418.96
18.13	440.71
20.85	464.87
23.74	485.37
26.79	499.02
30.00	559.75

CUADRO RESUMEN

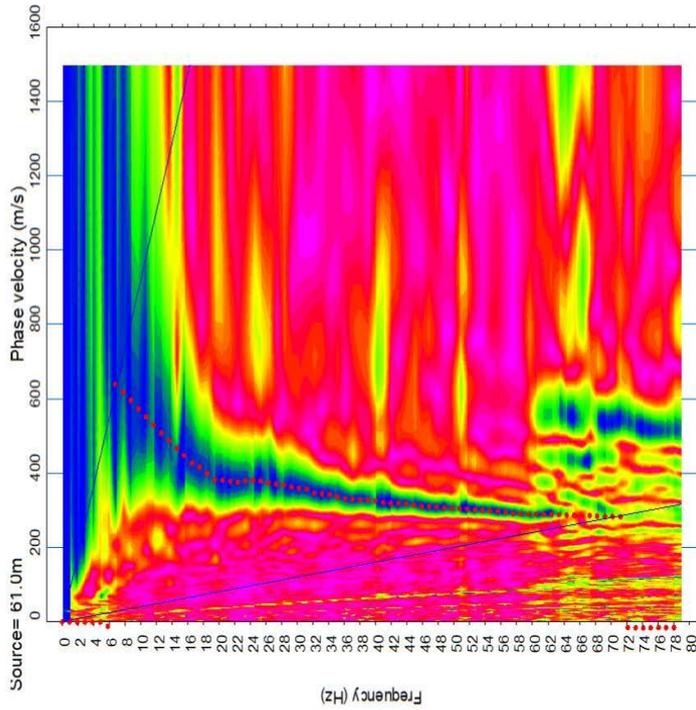
(E.030-2019)	(IBC-2015)
SUELOS INTERMEDIOS – S2	SUELO MUY DENSO O ROCA BLANDA – C
CLASIFICACION DEL PERFIL DEL SUELO	

CÓDIGO: MASW-07 FECHA: 20/05/2021

ESTE: 277498.38m E NORTE: 8679467.29m S

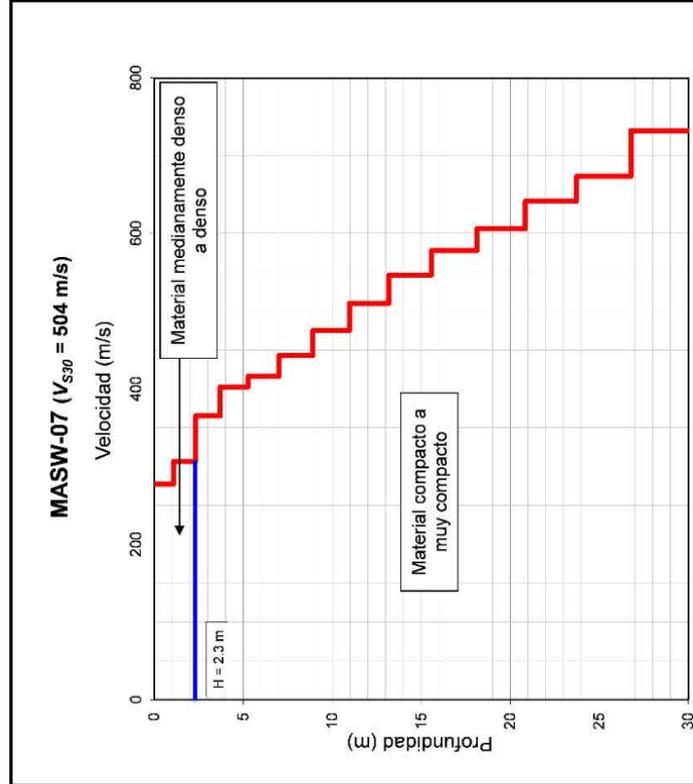
ELAB: A.M.V.N.

CURVA DE DISPERSIÓN



REGISTRO : sxco0703.sg2
SHOT : 03

PERFIL UNIDIMENSIONAL



CUADRO RESUMEN

Prof. (m)	V_s (m/s)
0.00	277.04
1.07	306.70
2.31	365.17
3.71	402.37
5.27	415.92
7.01	442.80
8.90	474.94
10.96	509.91
13.19	546.45
15.58	577.66
18.13	605.71
20.85	641.49
23.74	673.41
26.79	732.36
30.00	559.75

(E.030-2019)	(IBC-2015)
ROCA O SUELOS MUY RÍGIDOS – S1	SUELO MUY DENSO O ROCA BLANDA – C
CLASIFICACION DEL PERFIL DEL SUELO	

ELAB: A.M.V.N.

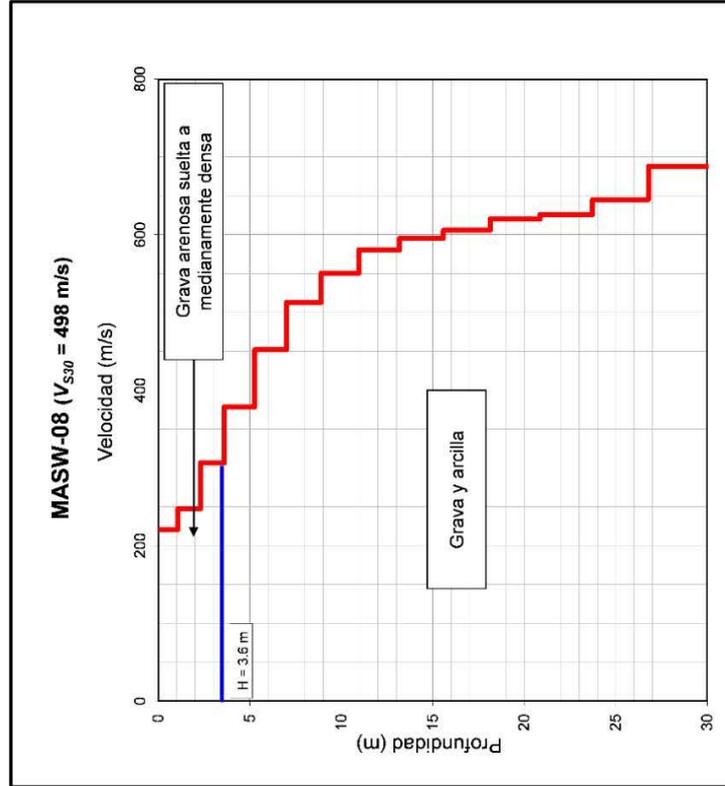
ESTE: 275219.69m E NORTE: 8679426.93m S

CÓDIGO:MASW-08 FECHA: 21/05/2021

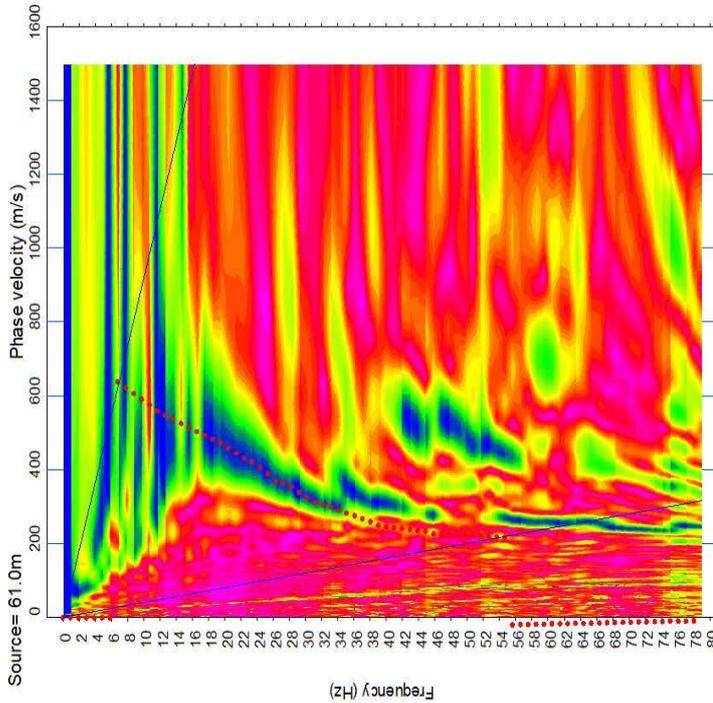
**CUADRO
RESUMEN**

Prof. (m)	V_s (m/s)
0.00	220.95
1.07	247.65
2.31	306.66
3.60	378.54
5.27	452.09
7.01	512.89
8.90	550.56
10.96	580.39
13.19	595.52
15.58	605.67
18.13	620.07
20.85	625.89
23.74	645.11
26.79	687.91
30.00	569.75

PERFIL UNIDIMENSIONAL



CURVA DE DISPERSIÓN



(E.030-2019)	(IBC-2015)
SUELOS INTERMEDIOS – S2	SUELO MUY DENSO O ROCA BLANDA – C
CLASIFICACION DEL PERFIL DEL SUELO	

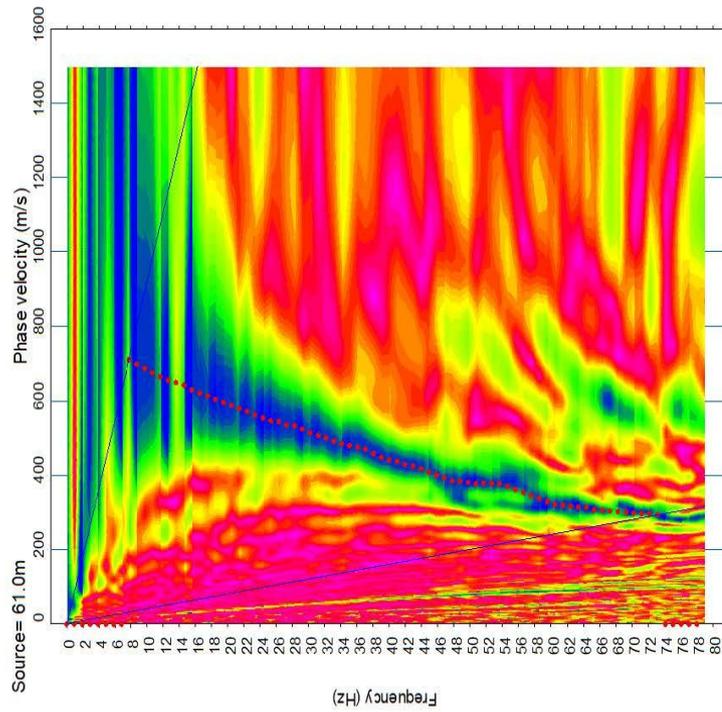
REGISTRO : sxco0803.sg2
SHOT : 03

CÓDIGO: MASW-09 FECHA: 17/06/2021

ESTE: 275700.26m E NORTE: 8678312.82m S

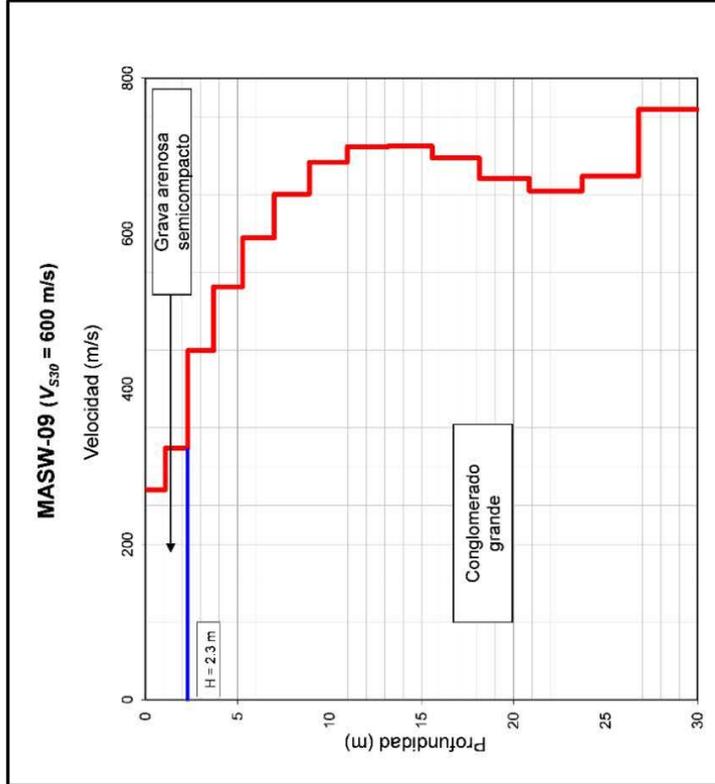
ELAB: A.M.V.N.

CURVA DE DISPERSIÓN



REGISTRO : sxre0506.sg2
SHOT : 03

PERFIL UNIDIMENSIONAL



CUADRO RESUMEN

Prof. (m)	V_s (m/s)
0.00	270.29
1.07	323.52
2.31	449.37
3.71	531.41
5.27	594.34
7.01	650.58
8.90	691.73
10.96	711.40
13.19	712.39
15.58	697.20
18.13	670.95
20.85	655.04
23.74	673.94
26.79	759.72
30.00	559.75

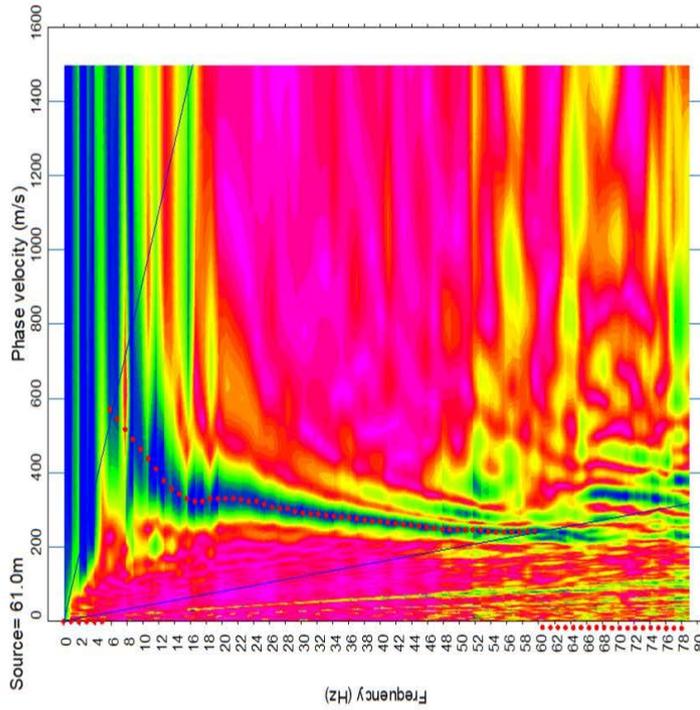
(E.030-2019)	(IBC-2015)
ROCA O SUELOS MUY RÍGIDOS – S1	SUELO MUY DENSO O ROCA BLANDA – C
CLASIFICACION DEL PERFIL DEL SUELO	

CÓDIGO: MASW-10 FECHA: 20/05/2021

ESTE: 276846.83m E NORTE: 8677129.44m S

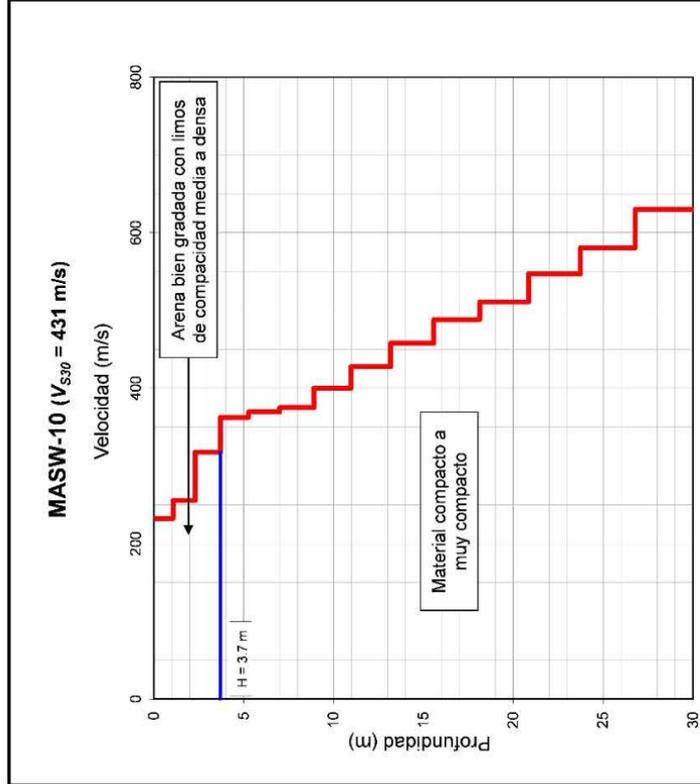
ELAB: A.M.V.N.

CURVA DE DISPERSIÓN



REGISTRO : sxco1003.sg2
SHOT : 03

PERFIL UNIDIMENSIONAL



CUADRO RESUMEN

Prof. (m)	V_s (m/s)
0.00	232.43
1.07	255.42
2.31	317.69
3.71	362.62
5.27	369.55
7.01	374.96
8.90	399.85
10.96	427.44
13.19	457.90
15.58	488.54
18.13	511.08
20.85	547.02
23.74	580.55
26.79	629.97
30.00	559.75

(E.030-2019)	(IBC-2015)
SUELOS INTERMEDIOS – S2	SUELO MUY DENSO O ROCA BLANDA – C
CLASIFICACION DEL PERFIL DEL SUELO	

ELAB: A. M. V. N.

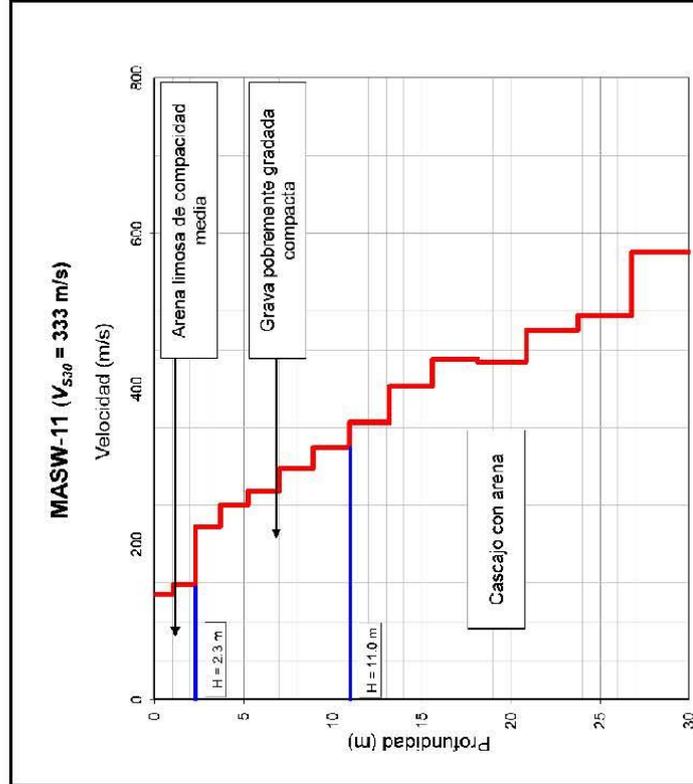
ESTE: 275755.51m E NORTE: 8676268.99m S

CÓDIGO: MASW-11 FECHA: 20/05/2021

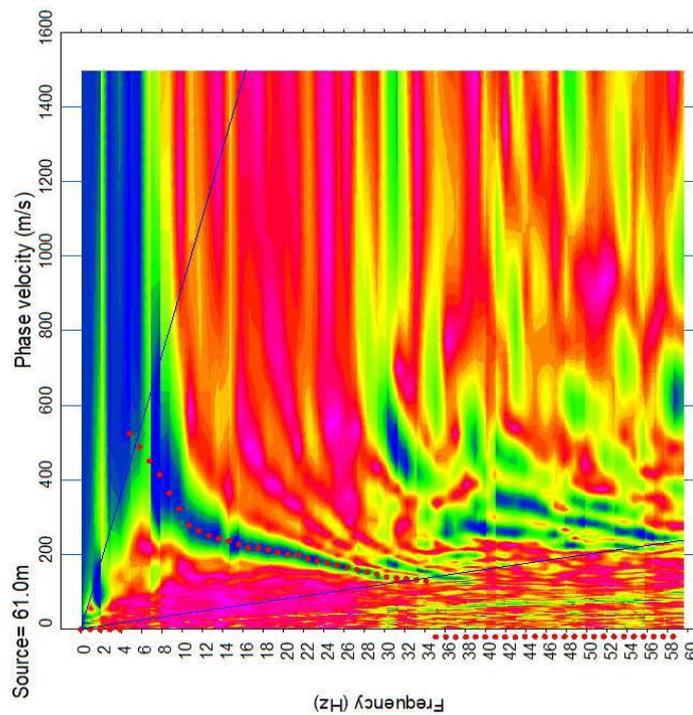
**CUADRO
RESUMEN**

Prof. (m)	V_s (m/s)
0.00	136.11
1.07	148.29
2.31	223.10
3.71	250.80
5.27	267.95
7.01	297.84
8.90	324.61
10.96	357.03
13.19	402.67
15.58	437.52
18.13	434.45
20.85	475.22
23.74	493.99
26.79	576.01
30.00	559.75

PERFIL UNIDIMENSIONAL



CURVA DE DISPERSIÓN



REGISTRO : sxco1103.sg2
SHOT : 03

(E.030-2019)	(IBC-2015)
SUELOS INTERMEDIOS – S2	SUELO RÍGIDO – D
CLASIFICACION DEL PERFIL DEL SUELO	

ELAB: A.M.V.N.

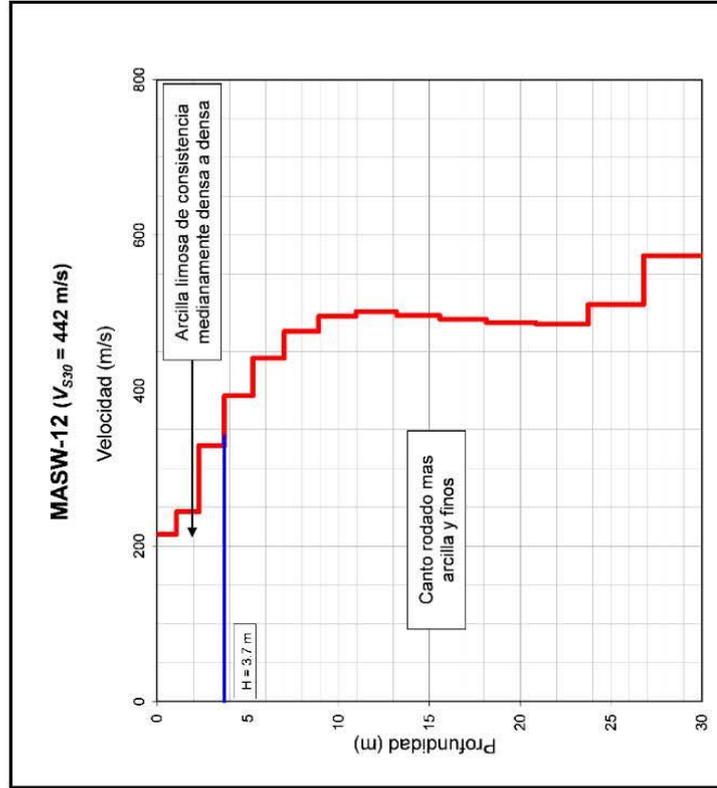
ESTE: 276206.11m E NORTE: 8681696.93m S

CÓDIGO:MASW-12 FECHA: 21/05/2021

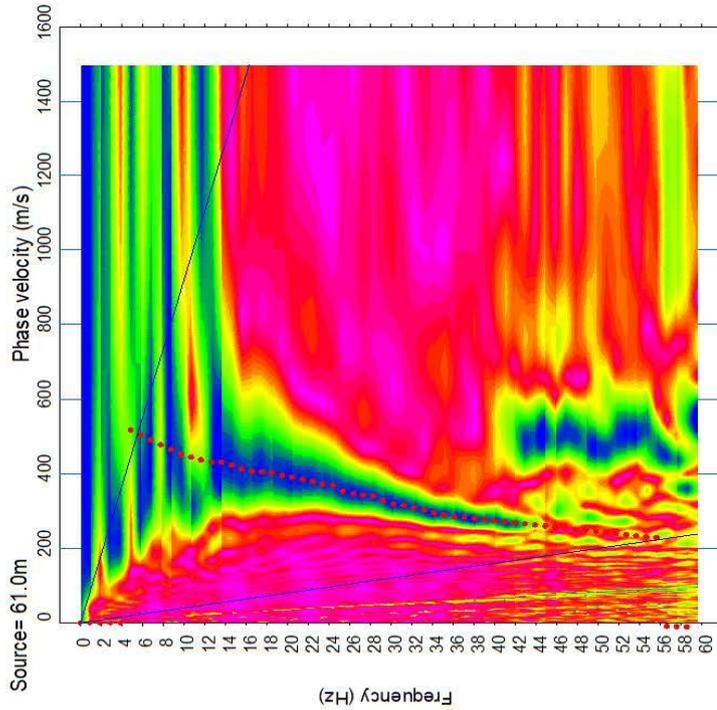
**CUADRO
RESUMEN**

Prof. (m)	V_s (m/s)
0.00	215.34
1.07	243.93
2.31	329.60
3.71	393.12
5.27	441.36
7.01	475.94
8.90	495.35
10.96	501.43
13.19	496.37
15.58	491.89
18.13	487.48
20.85	485.51
23.74	510.48
26.79	573.40
30.00	559.75

PERFIL UNIDIMENSIONAL



CURVA DE DISPERSIÓN

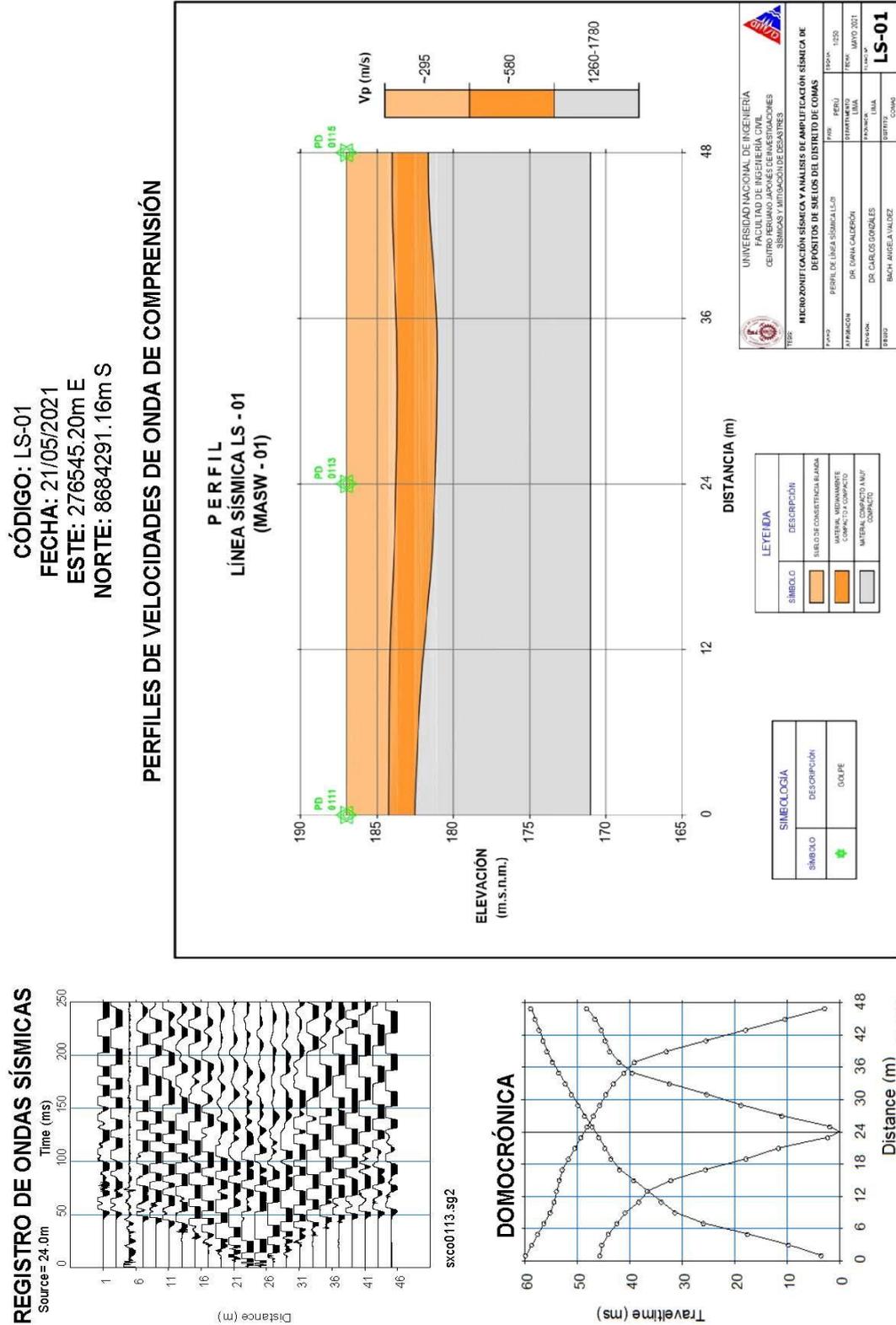


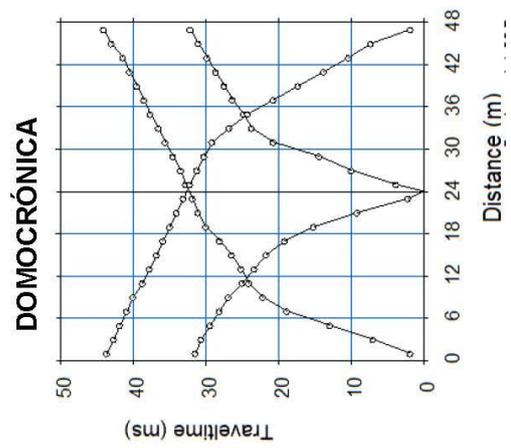
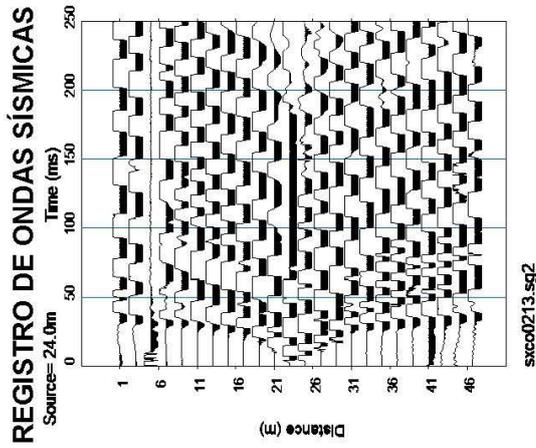
(E.030-2019)	(IBC-2015)
SUELOS INTERMEDIOS – S2	SUELO MUY DENSO O ROCA BLANDA – C
CLASIFICACION DEL PERFIL DEL SUELO	

REGISTRO : sxco1203.sg2
SHOT : 03

Anexo 10: Ensayo Refracción Sísmica Ejecutados

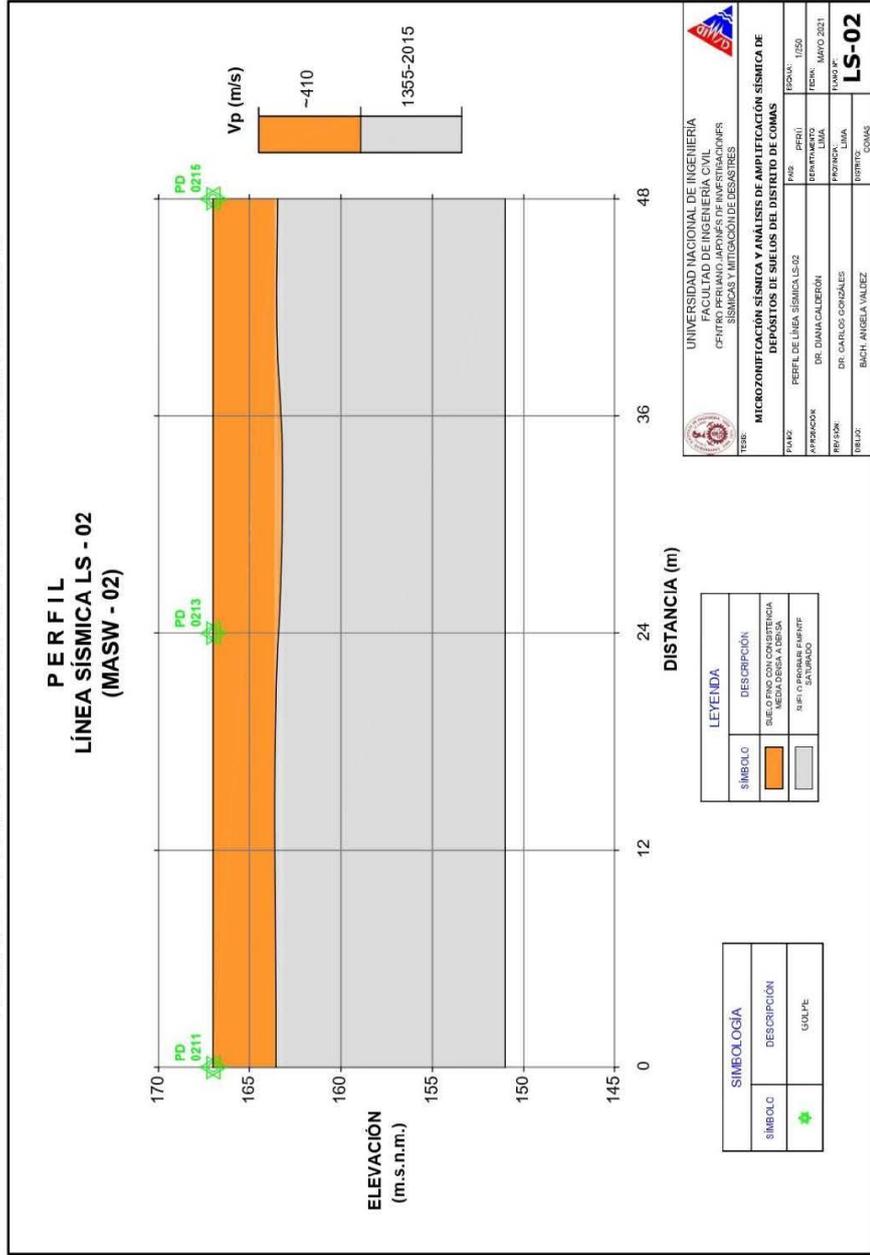
Ensayo Refracción Sísmica Ejecutados en el distrito de Comas-Registro de Ondas Sísmicas, Dromocrónica y Perfil Bidimensional de Ondas Longitudinales



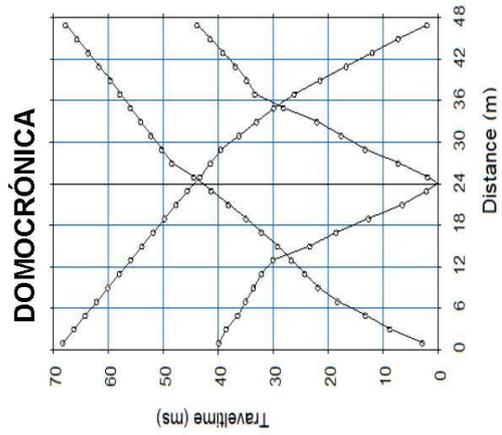
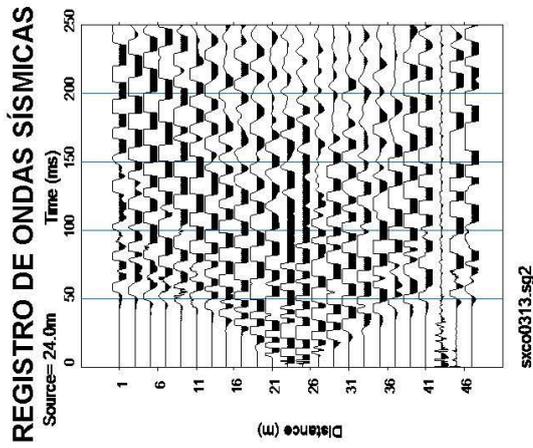


CÓDIGO: LS-02
FECHA: 20/05/2021
ESTE: 275926.69m E
NORTE: 8683259.10m S

PERFILES DE VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN

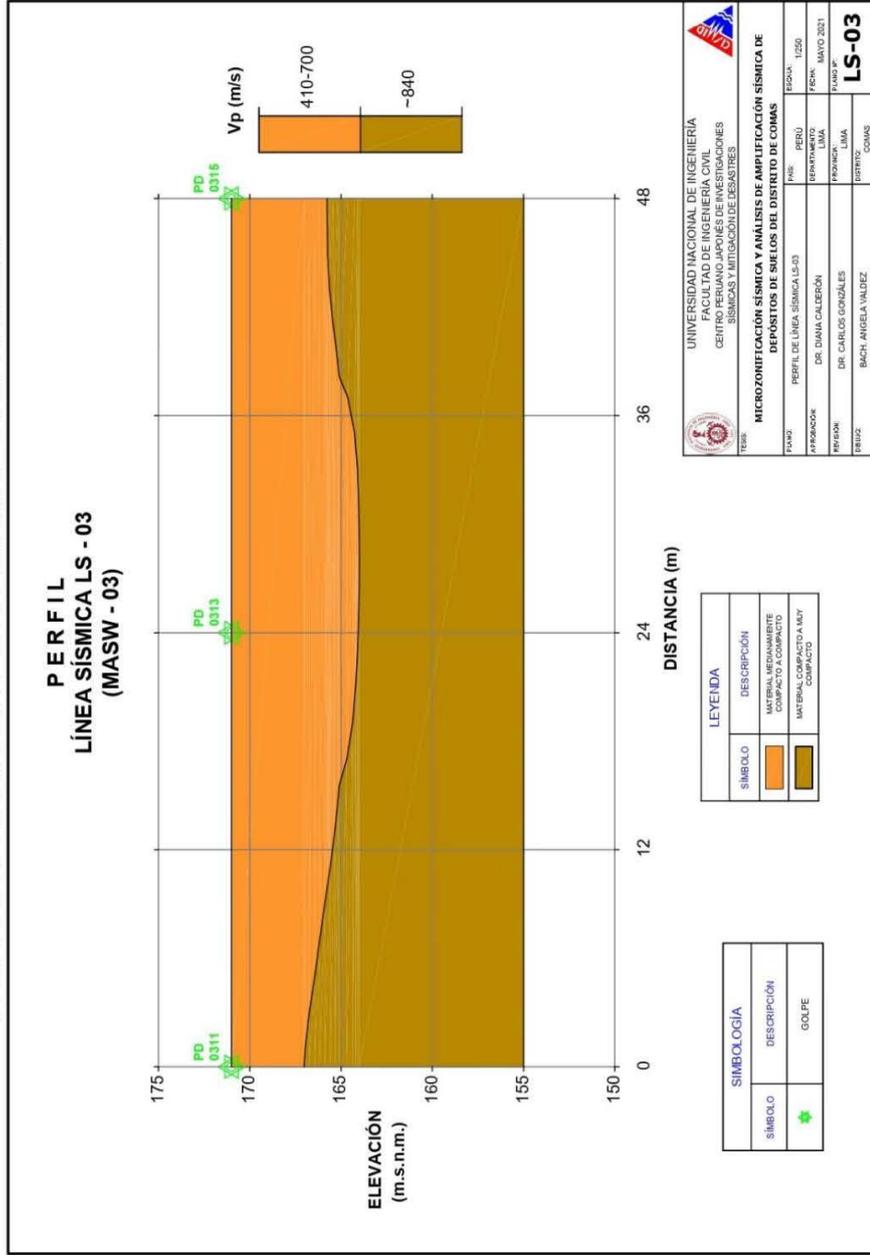


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL CENTRO PERUANO DE INVESTIGACIONES SÍSMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES		INSTITUCIÓN: IISD	
TEMA: MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE AMPLIFICACIÓN SÍSMICA DE DEPOSITOS DE SUELOS DEL DISTRITO DE COMAS		TÍTULO: LS-02	
PROYECTO: PERFIL DE LÍNEA SÍSMICA LS-02	FECHA: FEBR. 2021	DEPARTAMENTO: LIMA	FECHA: MAYO 2021
APROBACIÓN: DR. DANIEL CALDERÓN	PROFESOR: LINA	PROFESOR: LINA	PROFESOR: LINA
PREPARACIÓN: DR. CARLOS GONZALES	BOLETÍN: LINA	BOLETÍN: LINA	BOLETÍN: LINA
DISEÑO: BACH. ANGELA VALDEZ	BOLETÍN: COMAS	BOLETÍN: COMAS	BOLETÍN: COMAS



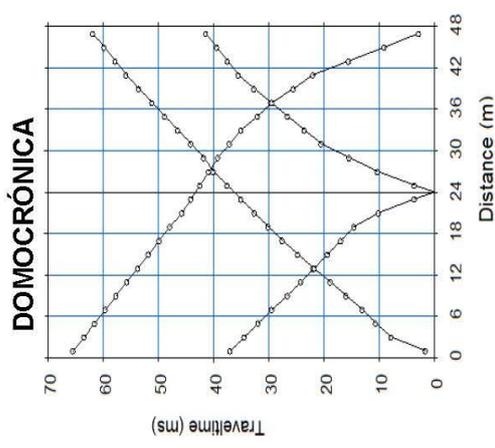
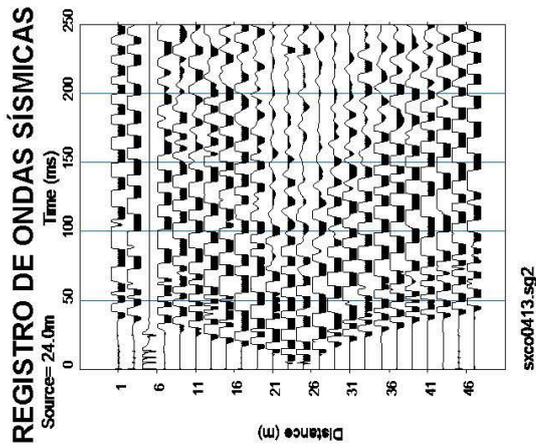
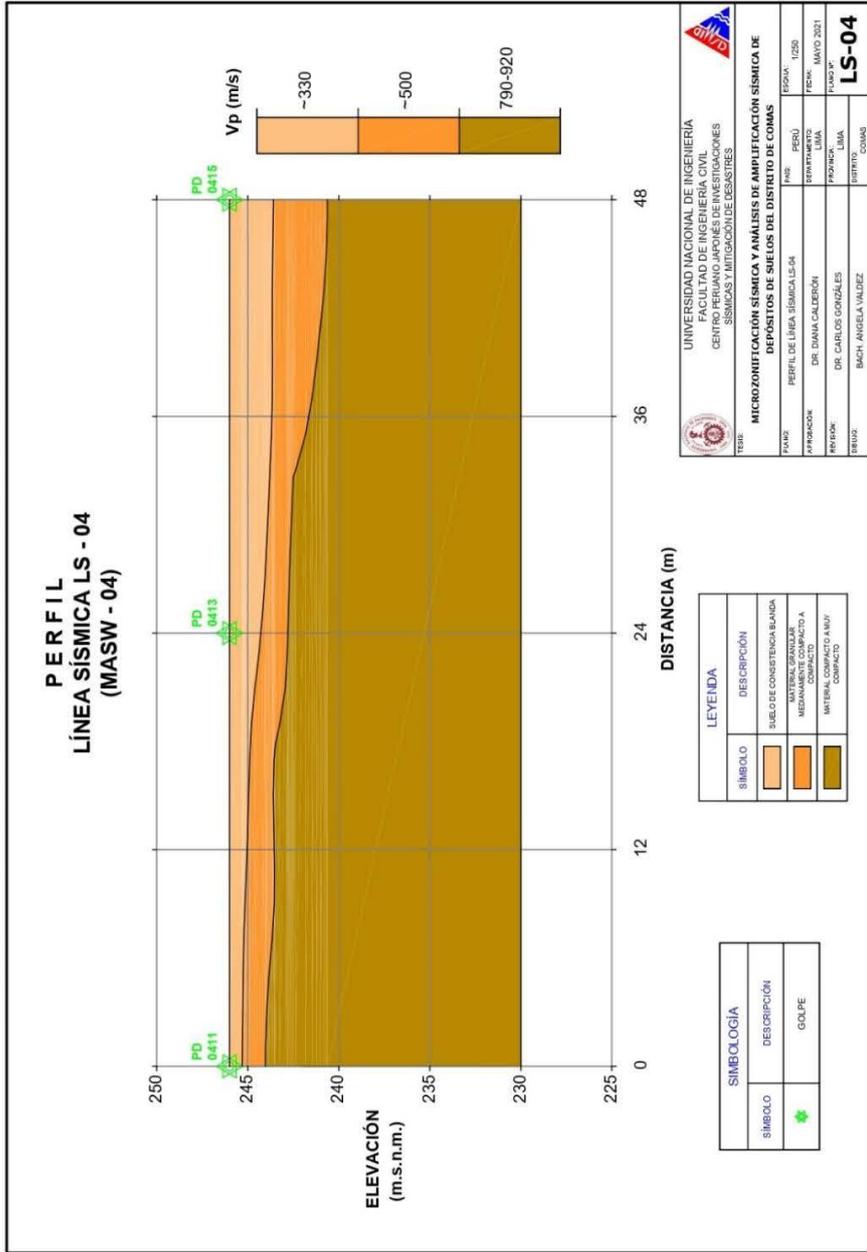
CÓDIGO: LS-03
FECHA: 21/05/2021
ESTE: 276801.24m E
NORTE: 8682820.65m S

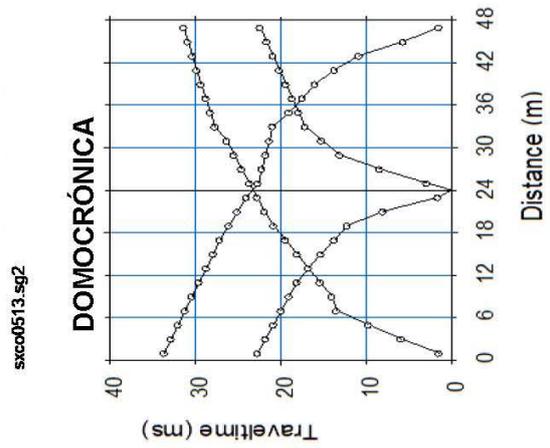
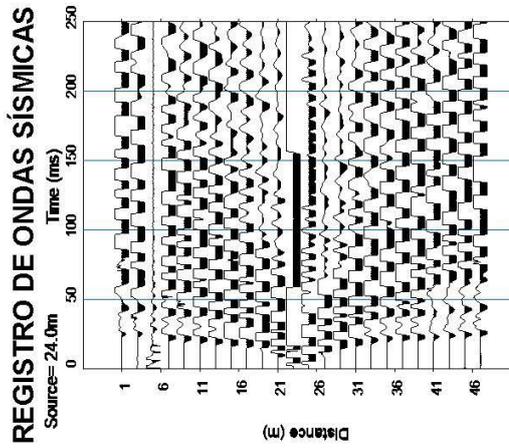
PERFILES DE VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN



CÓDIGO: LS-04
FECHA: 20/05/2021
ESTE: 279238.16m E
NORTE: 8682250.12m S

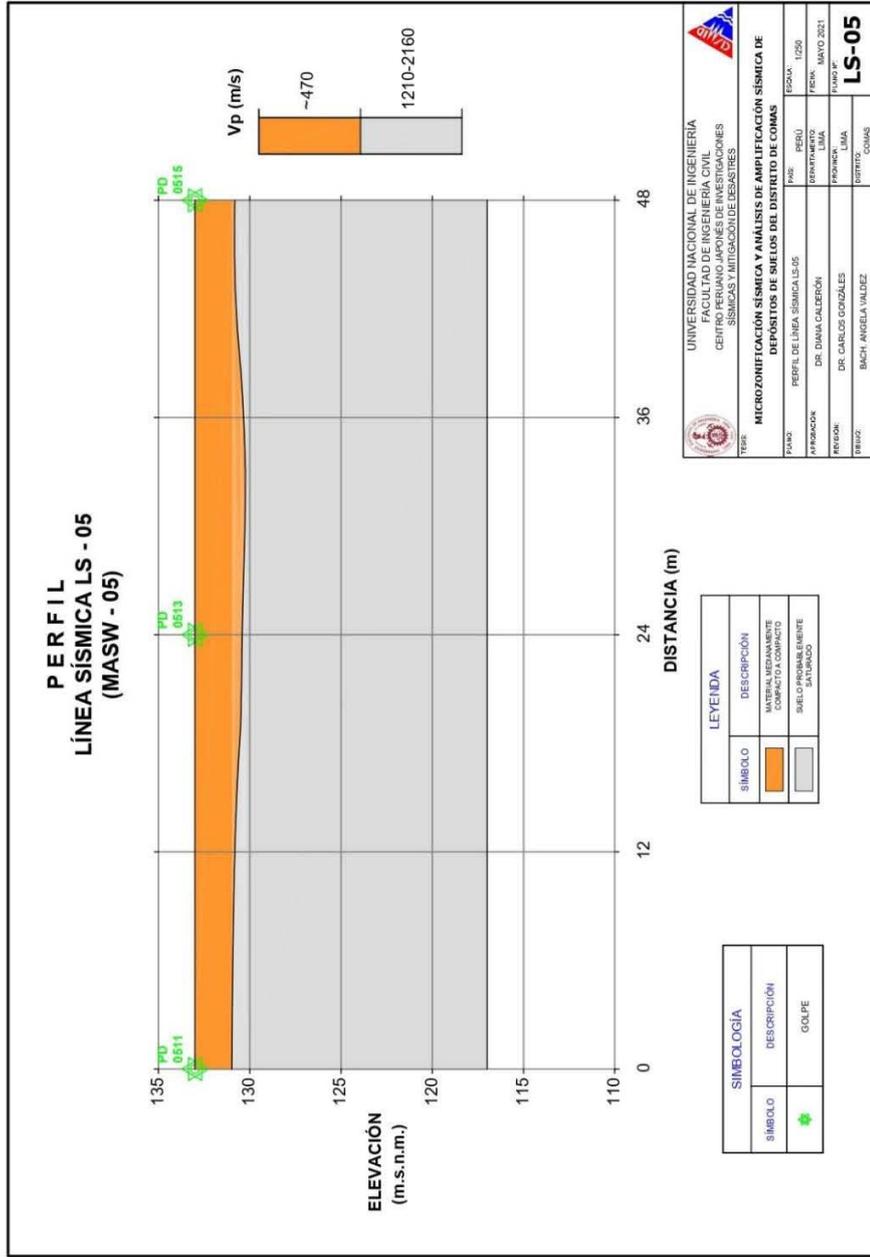
PERFILES DE VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN

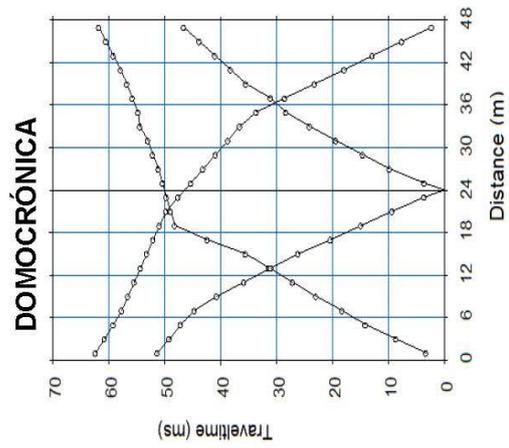
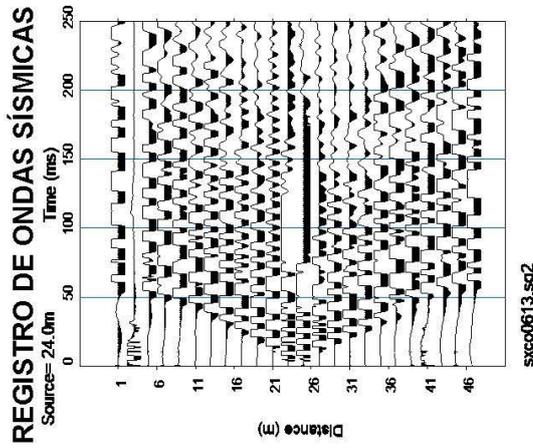




CÓDIGO: LS-05
FECHA: 20/05/2021
ESTE: 274427.91m E
NORTE: 8681671.97m S

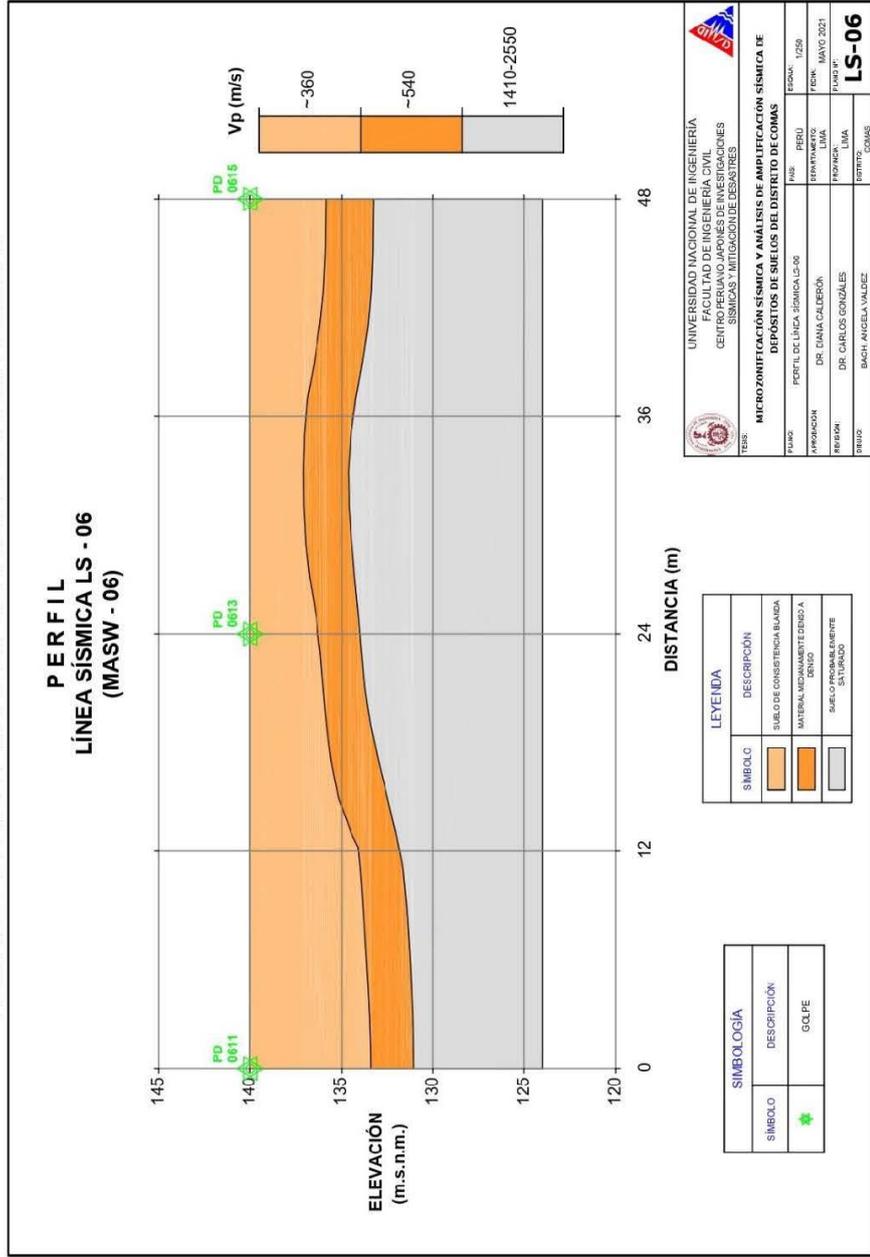
PERFILES DE VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN





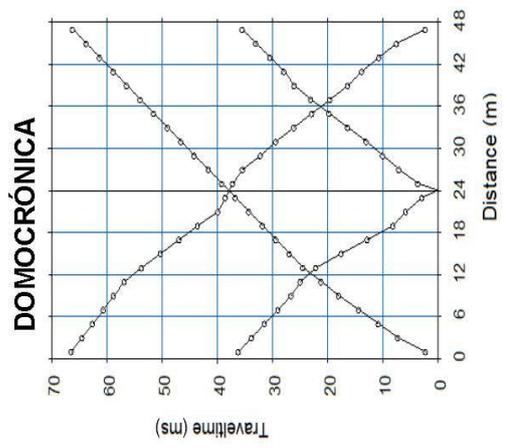
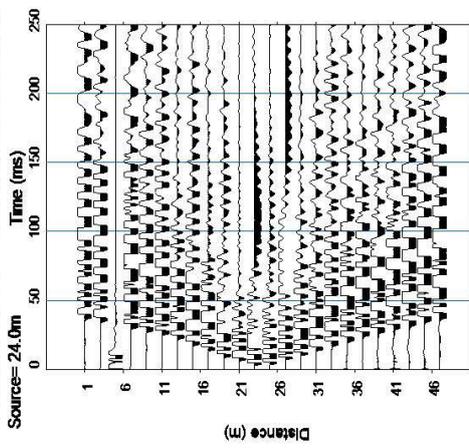
CÓDIGO: LS-06
FECHA: 21/05/2021
ESTE: 276370.59m E
NORTE: 8680776.99m S

PERFILES DE VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN



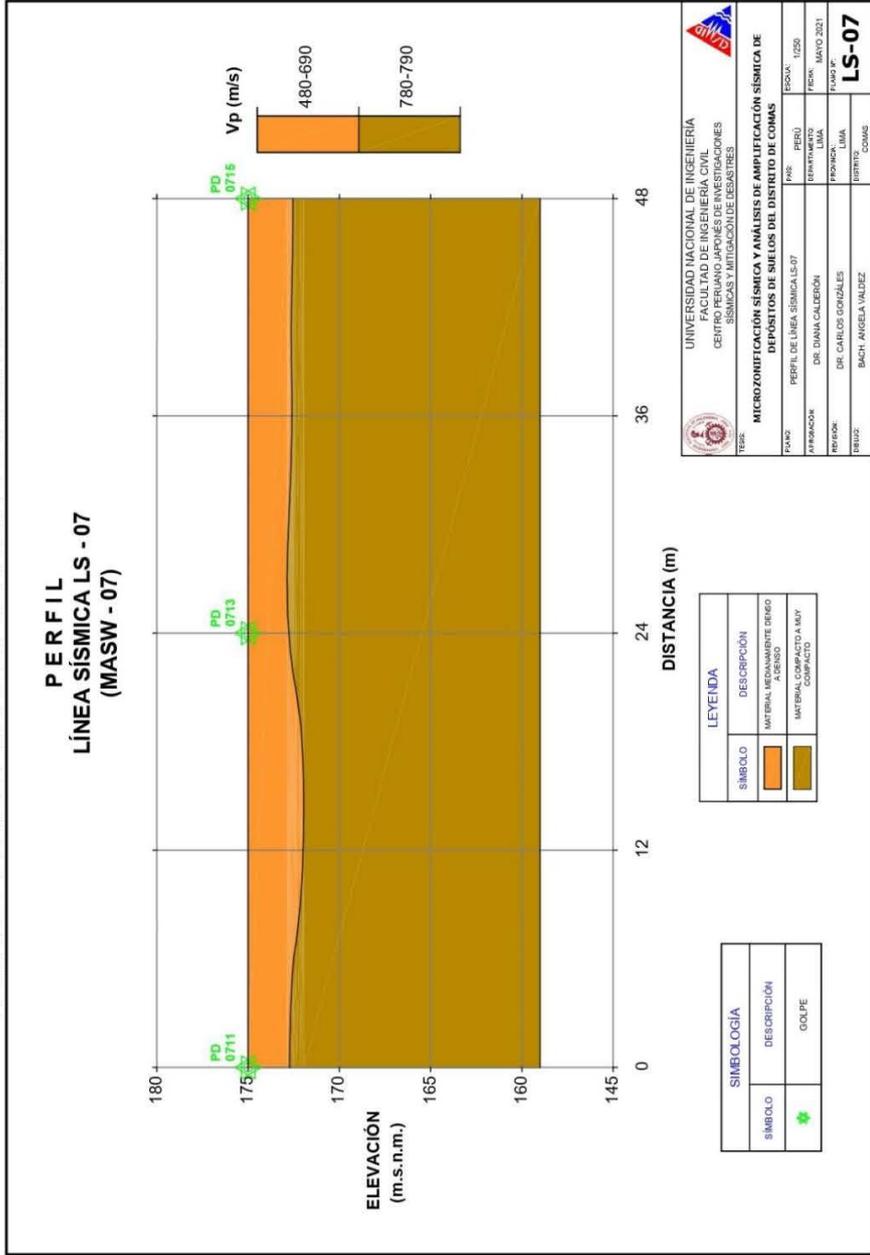
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA		INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES	
MICROZONIFICACION SISMICA Y ANALISIS DE AMPLIFICACION SISMICA DE DEPOSITOS DE SUELOS DEL DISTRITO DE COMAS			
PAIS:	PERU	ESCALA:	1:250
DEPARTAMENTO:	LIMA	FECHA:	MAYO 2021
PROYECTO:	LIMA	PROYECTISTA:	DR. CARLOS GONZALEZ
DISTRITO:	COMAS	REVISOR:	BACH. ANGELA VALDEZ
		LS-06	

REGISTRO DE ONDAS SÍSMICAS



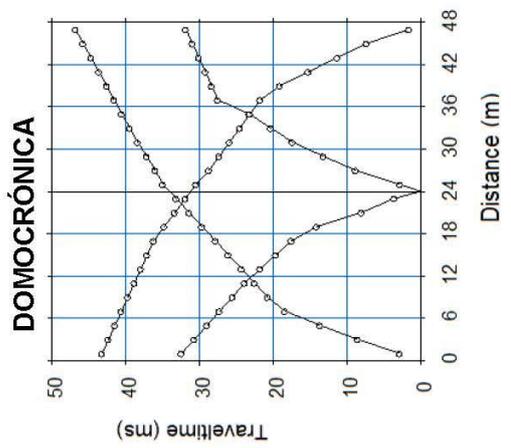
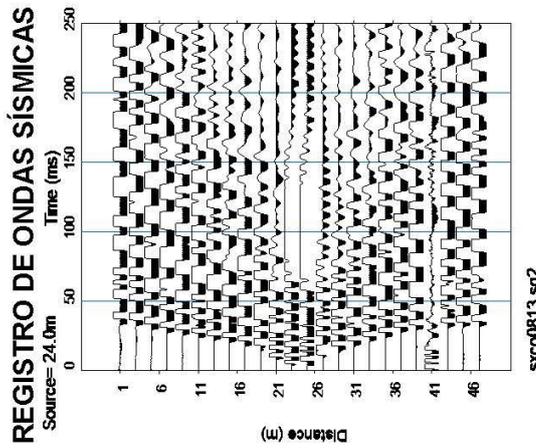
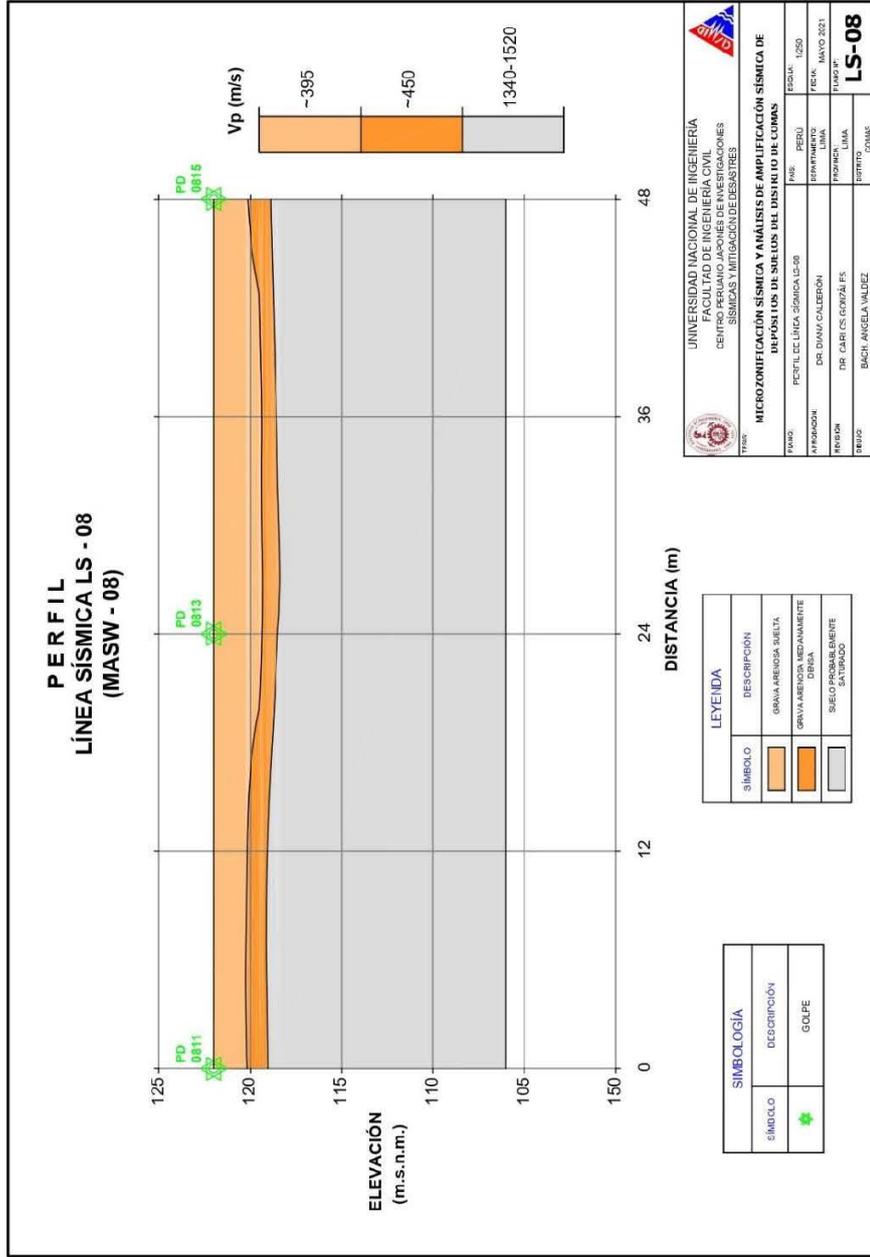
CÓDIGO: LS-07
FECHA: 20/05/2021
ESTE: 277498.38m E
NORTE: 8679467.29m S

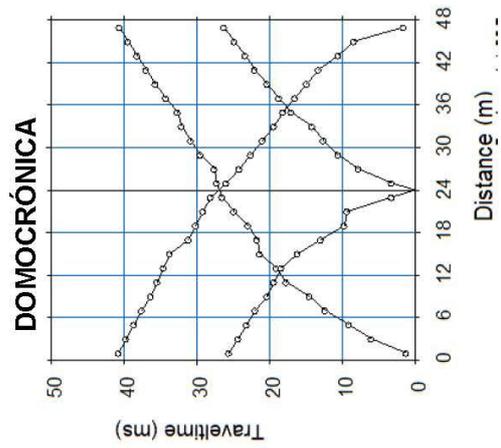
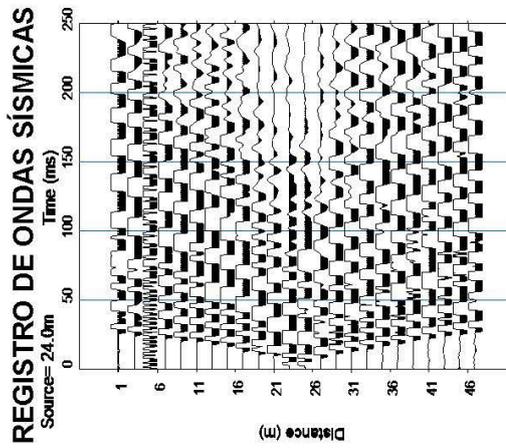
PERFILES DE VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN



CÓDIGO: LS-08
FECHA: 21/05/2021
ESTE: 275219.69m E
NORTE: 8679426.93m S

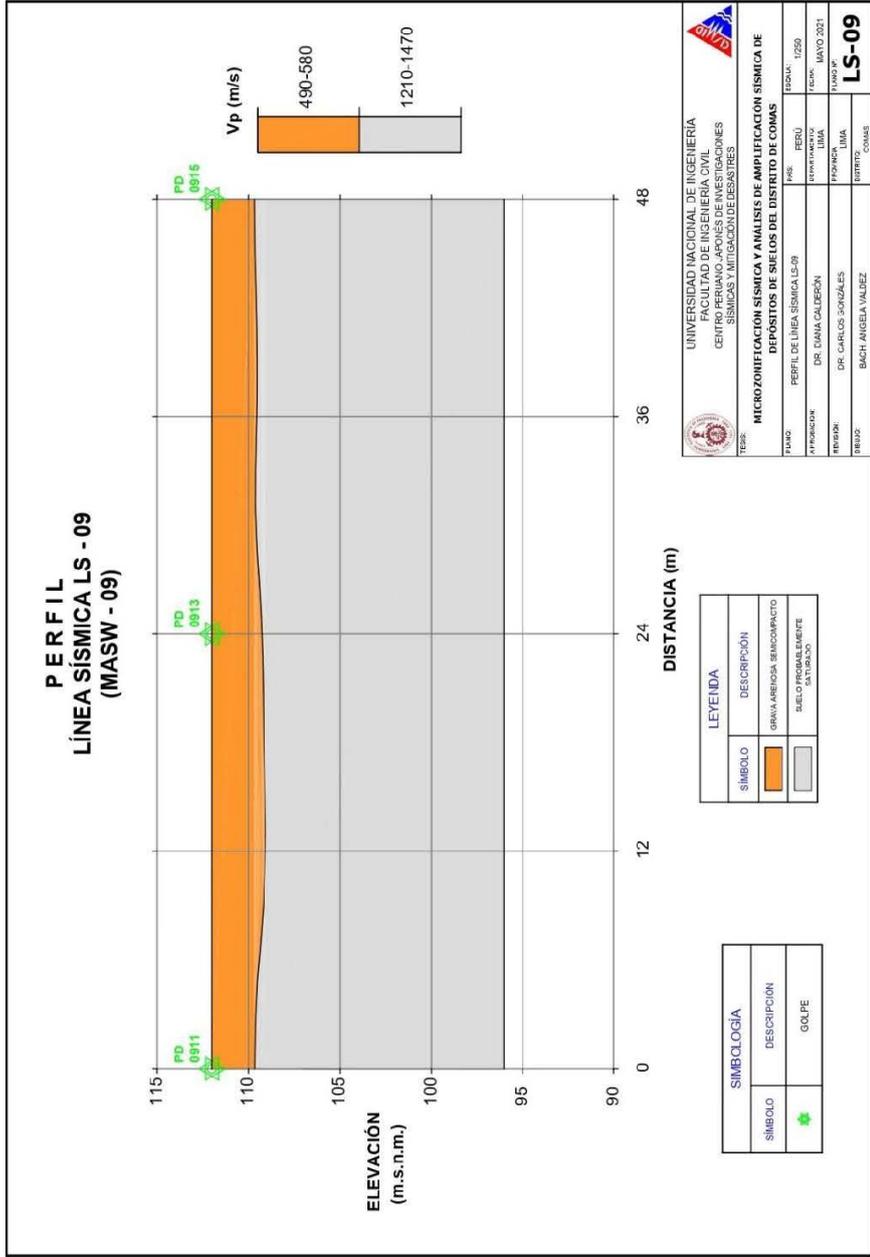
PERFILES DE VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN

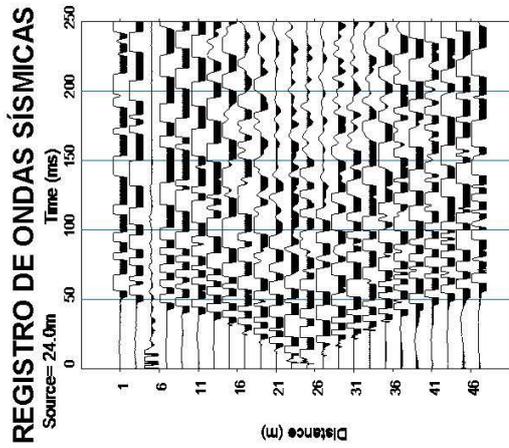




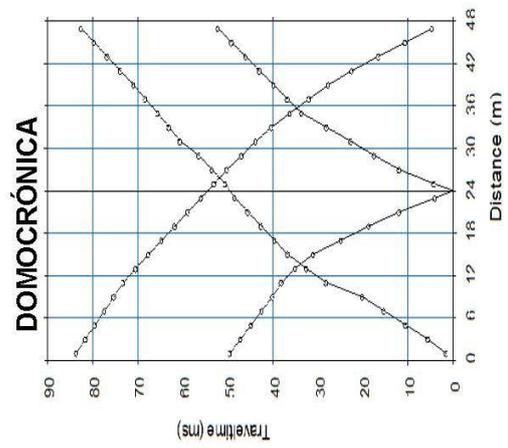
CÓDIGO: LS-09
FECHA: 21/05/2021
ESTE: 275775.02m E
NORTE: 8678363.71m S

PERFILES DE VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN



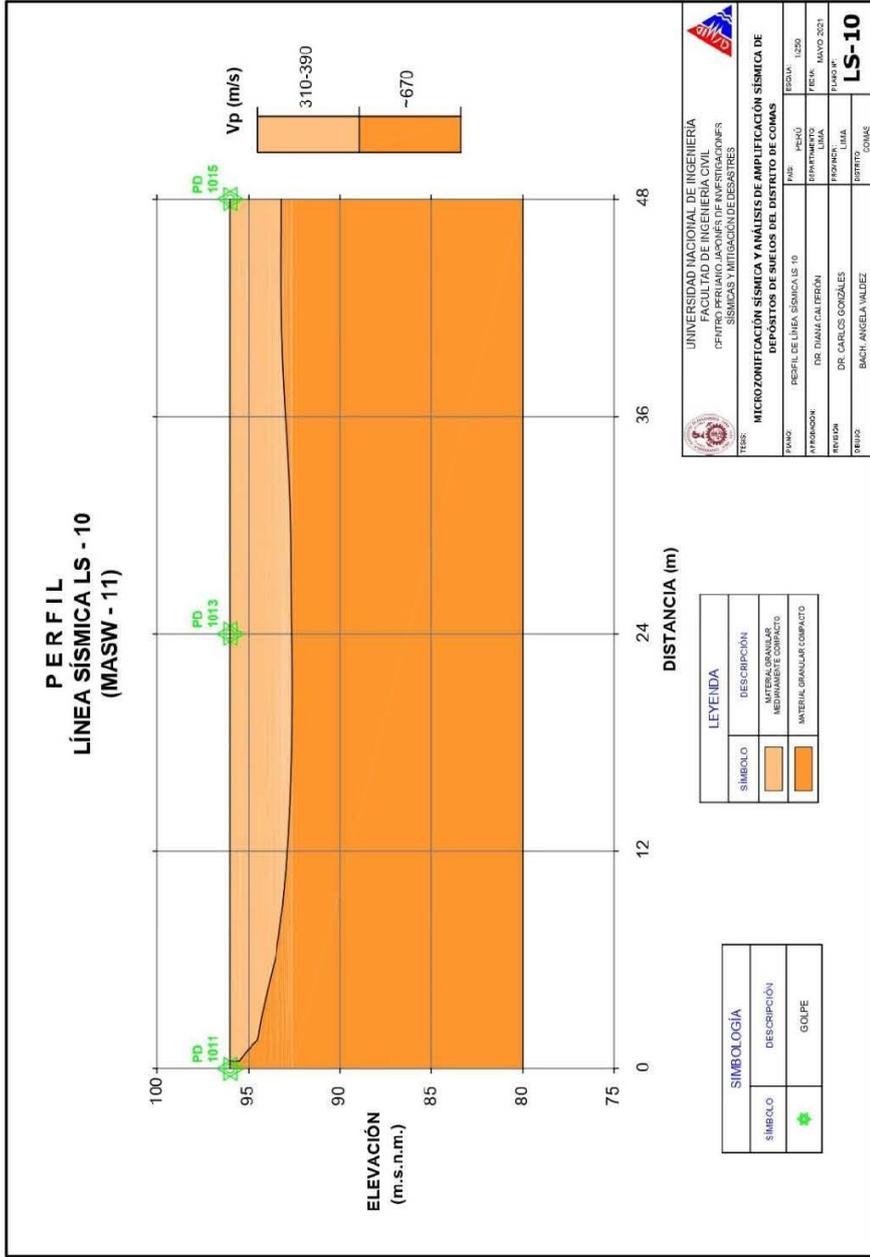


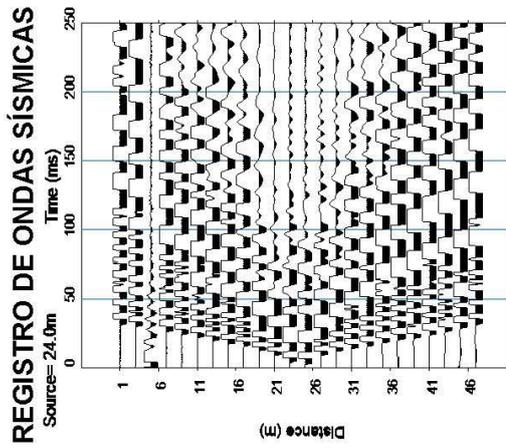
sxco1113.sg2



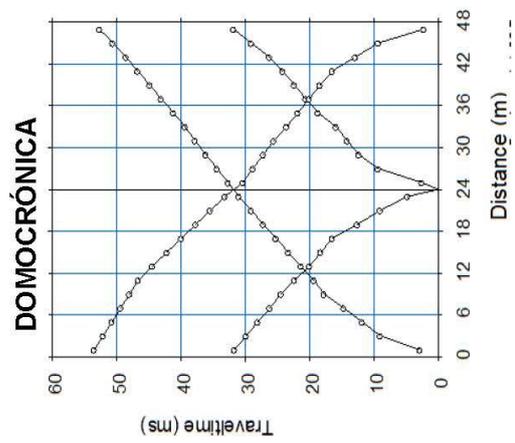
CÓDIGO: LS-10
FECHA: 20/05/2021
ESTE: 275755.51m E
NORTE: 8676268.99m S

PERFILES DE VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN



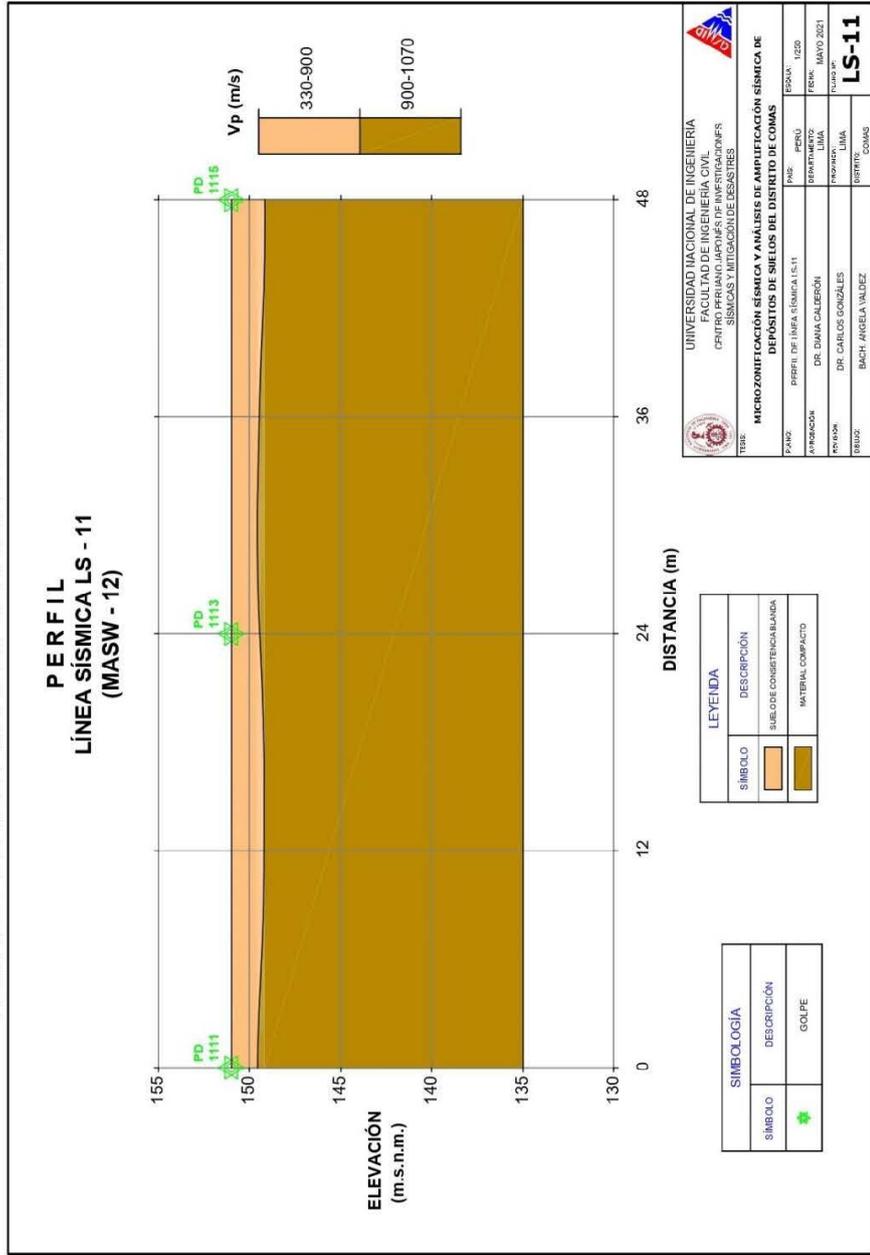


sxco1213.sg2



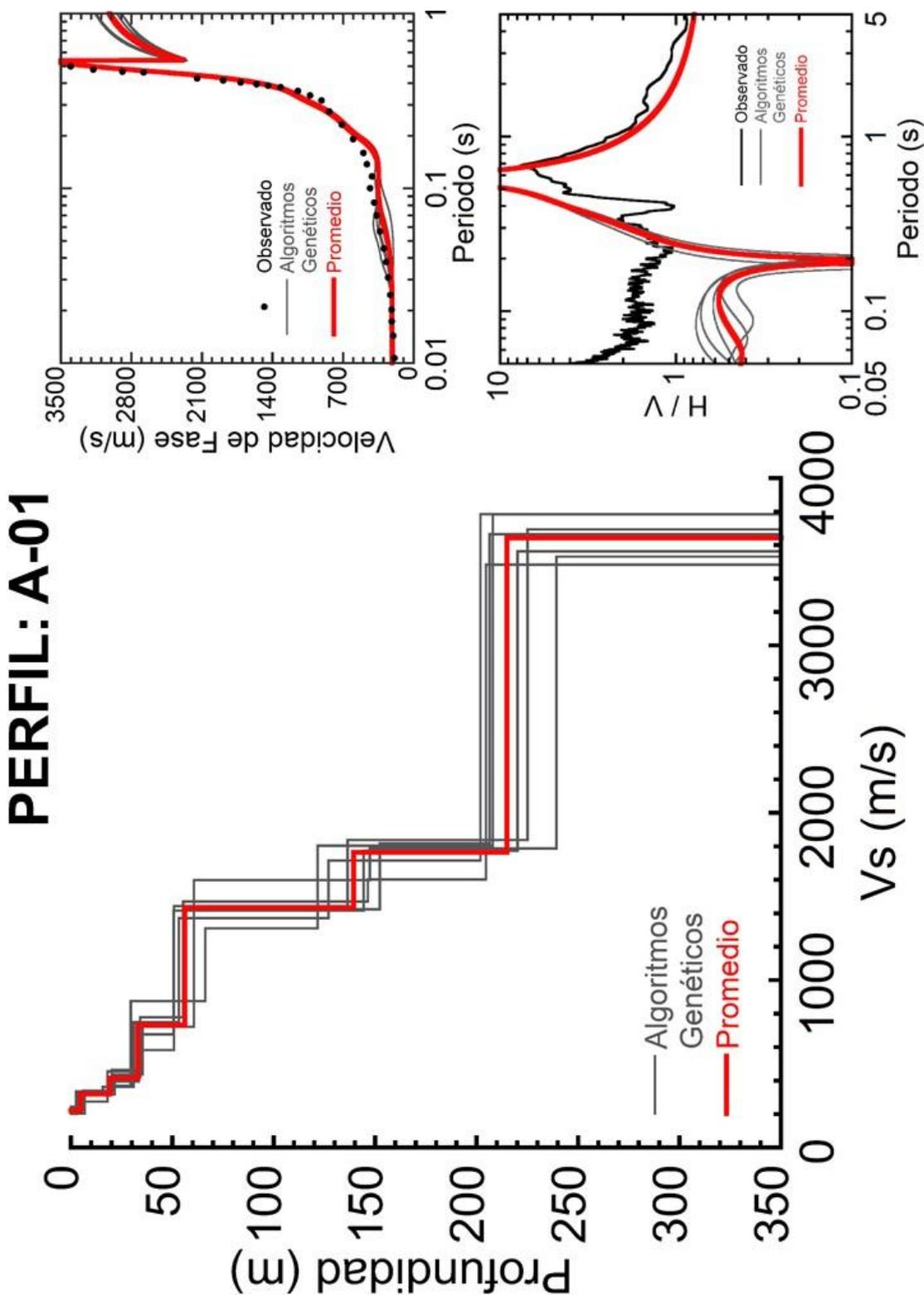
CÓDIGO: LS-11
FECHA: 21/05/2021
ESTE: 276206.11m E
NORTE: 8681696.93m S

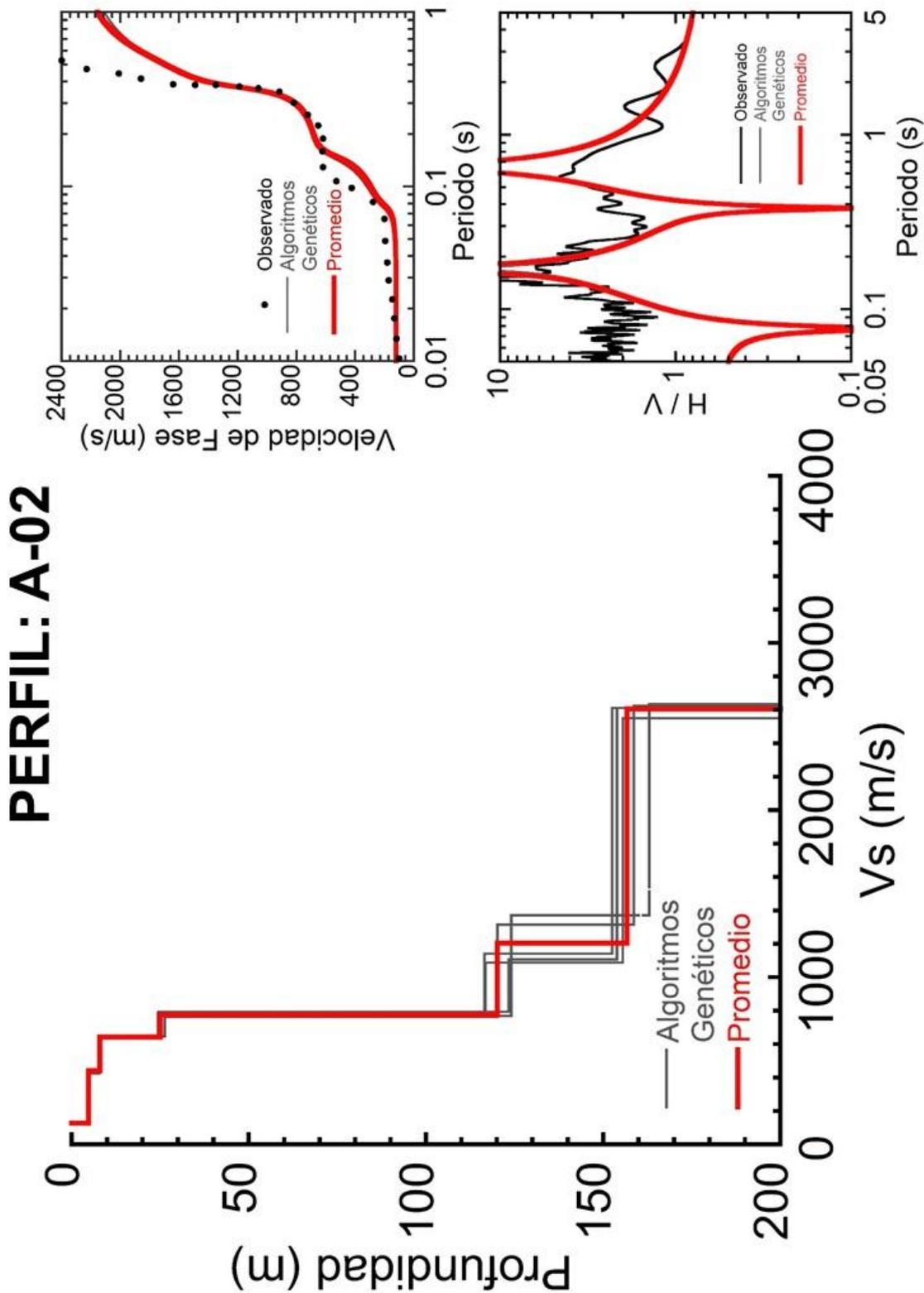
PERFILES DE VELOCIDADES DE ONDA DE COMPRESIÓN

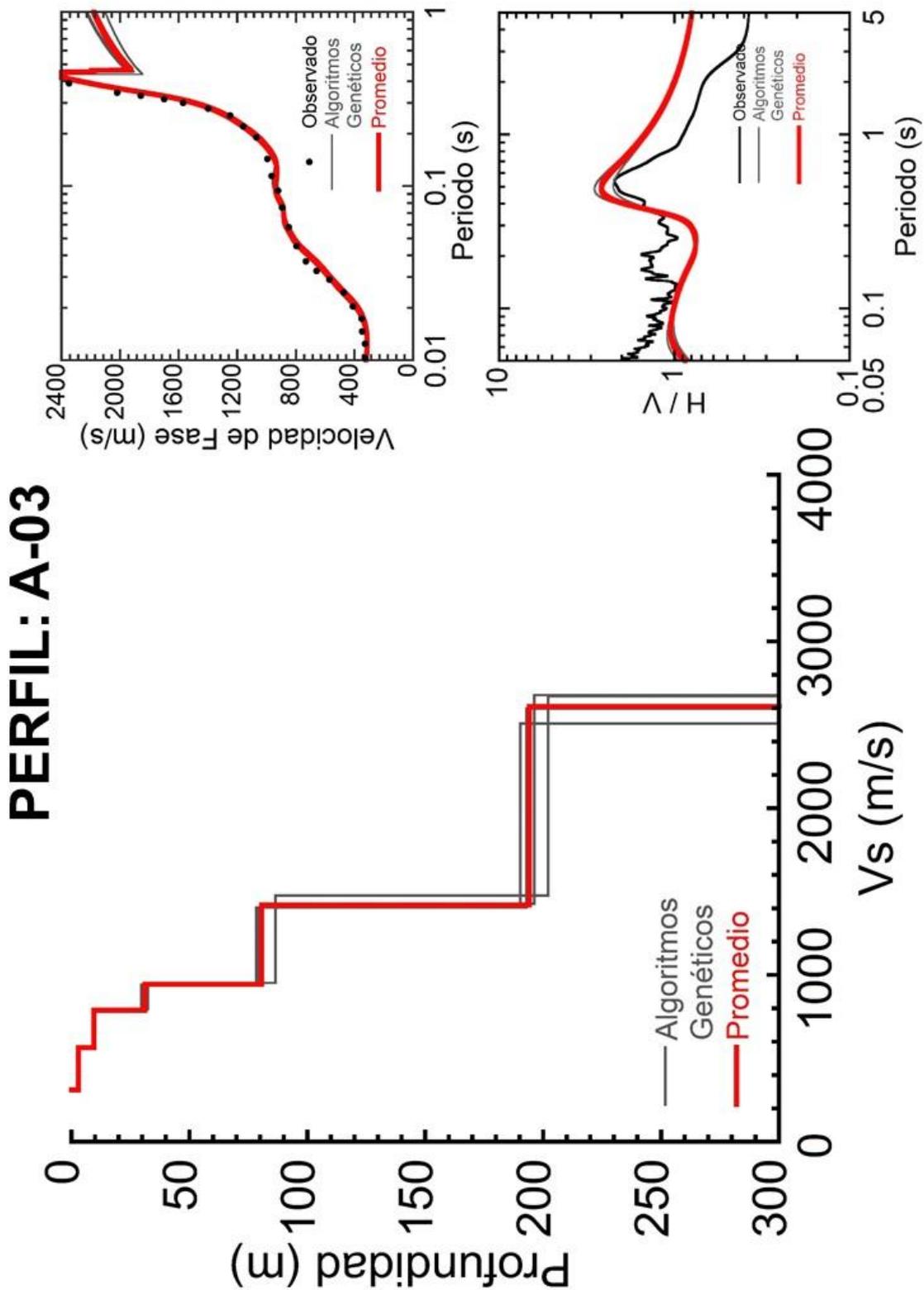


Anexo 11: Medición de Arreglos de Microtremores Ejecutados

Medición de Arreglos de Microtremores Ejecutados en el Distrito de Comas - Curvas de Dispersión, Verificación de los Perfiles Obtenido y Perfil de Velocidades de Ondas de Corte de las Mediciones Ejecutadas.







Anexo 12: Espectro de Peligro Uniforme (EPU) en Roca

Espectro de Peligro Uniforme (EPU) en Roca para los Arreglos Recopilados y Ejecutados.

CÓD.	(1) AR-01	(2) AR-02	(3) AR-03 A-02	(4) AR-04	(5) A-01	(6) A-03	(7) CISMID
	(-11.933°, -77.065°)	(-11.926°, -77.045°)	(-11.906°, -77.041°)	(-11.930°, -77.059°)	(-11.928°, -77.062°)	(-11.951°, -77.058°)	(-11.930°, -77.04°)
T(s)	Pseudoaceleraciones (cm/s ²)						
0.00	515	514	513	515	515	515	514
0.05	729	727	725	728	728	729	727
0.10	1070	1060	1060	1070	1070	1070	1060
0.15	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050
0.30	843	842	841	843	843	844	842
0.50	637	635	634	636	636	637	635
1.00	320	319	318	320	320	320	319
2.00	141	141	141	141	141	141	141
3.00	76.8	76.7	76.6	76.8	76.8	76.9	76.7

Anexo 13: Registros Sísmicos Evaluados para el EPU-Normalizado

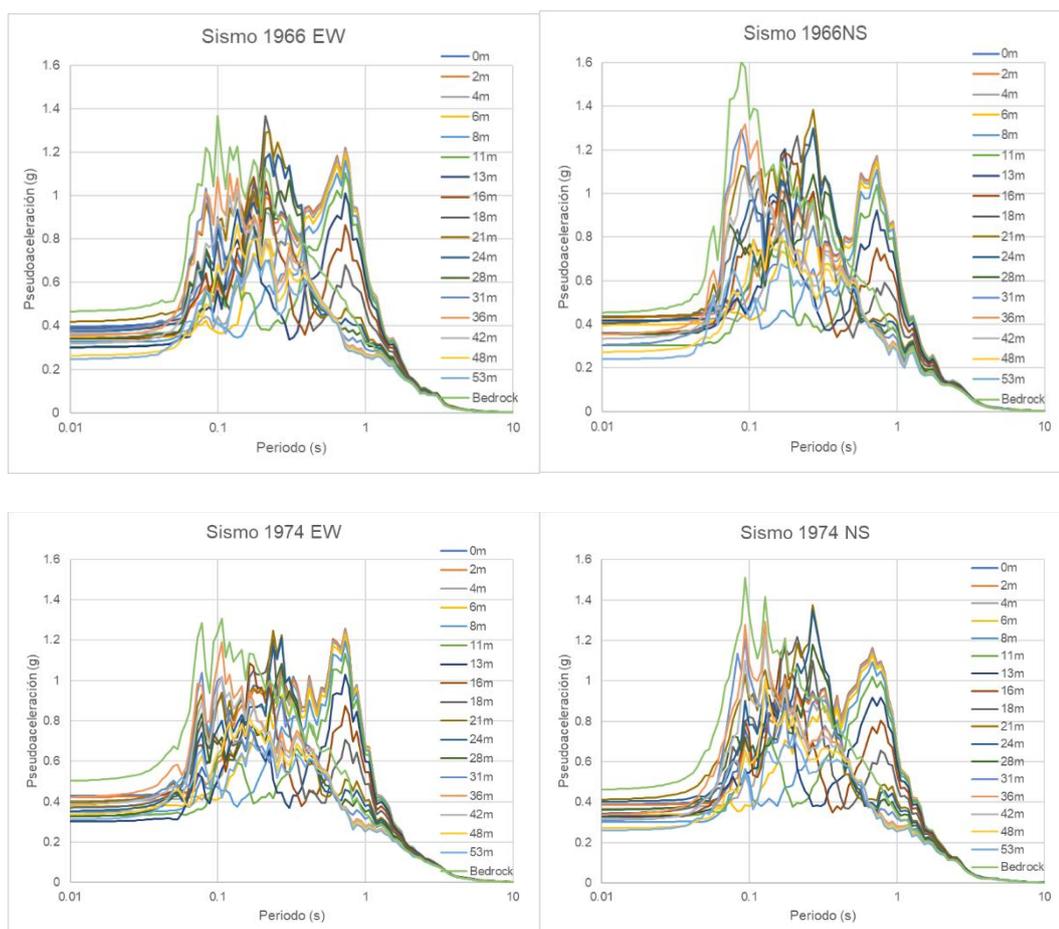
Registros Sísmicos Evaluados para el Análisis de Espectro de Peligro Uniforme Normalizado.

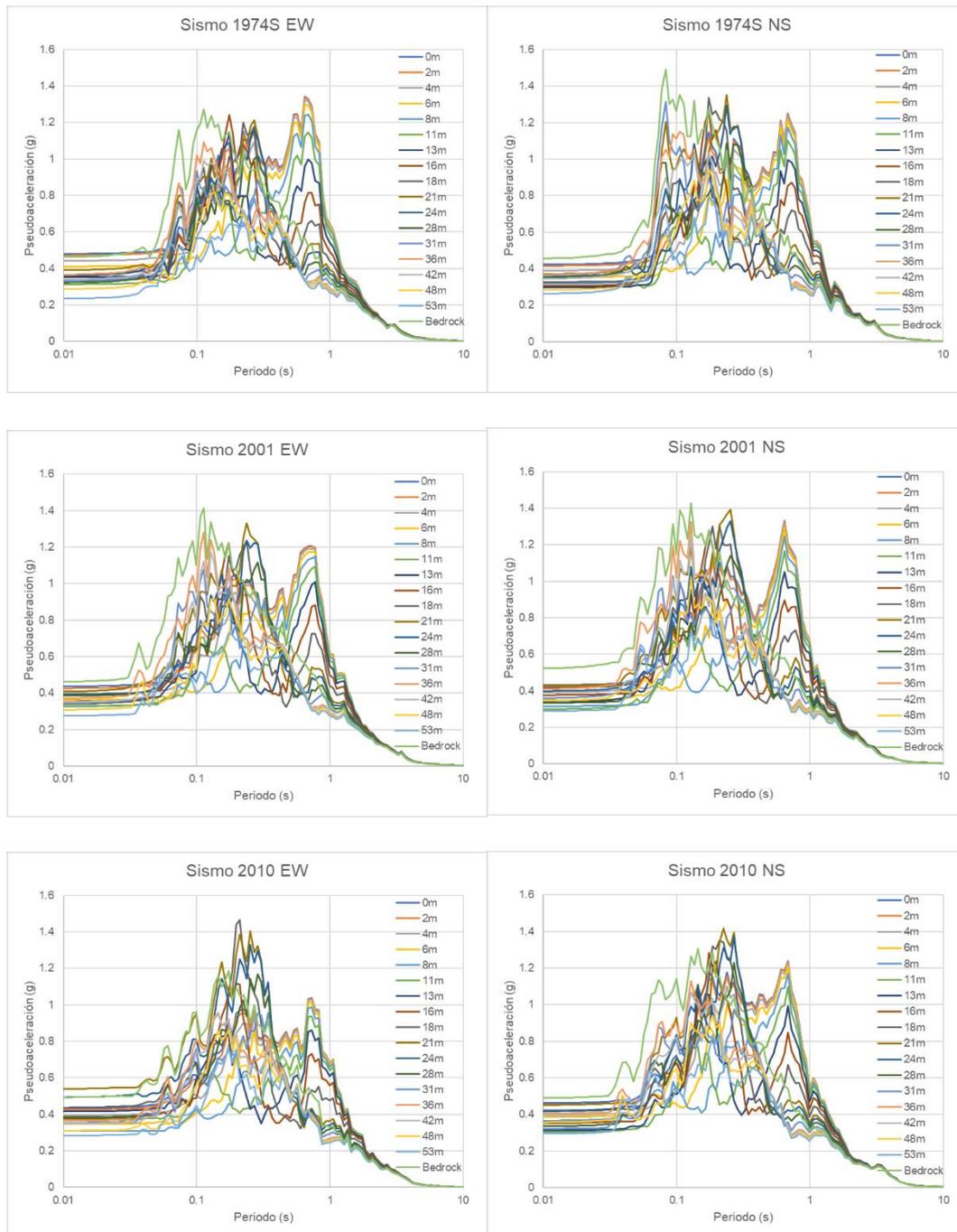
Nº	FECHA	HORA	LATITUDE (°)	LONGITUD (°)	PROF (KM)	MAGNITU D	
1	11/09/2017	12:24:48	-12.43	-76.66	89	3.8	ML
2	22/10/2017	00:09:13	-12.32	-77.34	36	4.7	ML
3	1/11/2017	03:36:03	-11.77	-77.55	50	4.4	ML
4	29/11/2017	06:29:03	-14.58	-76.37	12	5.6	ML
5	24/11/2017	07:24:26	-12.1	-77.55	46	4.1	ML
6	24/11/2017	11:15:53	-12.09	-76.25	76	4.7	ML
7	14/01/2018	09:18:42	-16.07	-74.89	48	6.8	Mw
8	18/01/2018	20:11:39	-13.35	-74.68	100	5.2	ML
9	13/02/2018	19:26:45	-11.8346	-76.3203	89	3.6	ML
10	19/04/2018	15:19:09	-12.54	-77.06	25	3.7	ML
11	17/05/2018	06:07:13	-12.79	-76.87	49	5.5	ML
12	22/05/2018	13:08:34	-11.25	-78.15	30	4.9	ML
13	18/07/2018	17:00:54	-12.21	-76.7	72	4	ML
14	27/09/2018	17:00:07	-11.53	-78.26	35	4.9	ML
15	20/11/2018	01:38:03	-9.95	-79.03	46	5.7	ML
16	24/11/2018	15:20:59	-11.39	-78.1	50	4.5	ML
17	22/03/2019	07:50:00	-12.78	-76.89	43	4.9	ML
18	11/04/2019	10:50:31	-13.85	-76.48	63	5.3	ML
19	9/09/2020	18:17:03	-12.0401	-76.9329	93	4.5	Mw
20	31/10/2020	13:24:41	-10.2349	-75.2508	39	5.6	Mw
21	15/01/2021	18:51:16	-12.68	-77.06	40	4.3	Mw
22	17/01/2021	04:58:12	-11.82	-77.78	30	3.6	Mw

Nº	FECHA	HORA	LATITUDE (°)	LONGITUD (°)	PROF (KM)	MAGNITU D
23	12/01/2021	13:48:32	-12.45	-76.93	47	4.1 Mw
24	5/02/2021	18:55:16	-11.03	-78.19	30	4.8 Mw
25	18/04/2021	09:51:56	-12.53	-76.07	25	4.1 Mw
26	21/04/2021	12:24:52	-11.73	-77.24	71	3.8 Mw
27	19/04/2021	23:53:29	-12.61	-76.87	44	5 ML
28	27/06/2021	21:47:09	-11.5869	-76.8539	109	4.5 Mw
29	23/06/2021	07:02:28	-12.7388	-76.9302	46	4.7 Mw
30	22/06/2021	21:54:18	-12.77	-76.91	32	6 Mw
31	17/07/2021	11:21:00	-12.7561	-76.9581	45	4.2 Mw
32	24/08/2021	14:39:38	-12.31	-77.25	39	4.4 Mw
33	25/08/2021	02:15:08	-12.36	-77.51	41	5.1 Mw
34	28/11/2021	01:32:29	-12.04	-77.54	65	5.2 Mw
35	28/11/2021	05:52:12	-4.44	-77	131	7.5 Mw
36	7/01/2022	05:27:05	-11.96	-76.88	116	5.6 Mw

Anexo 14: Espectro de Respuesta A-01-Prof.

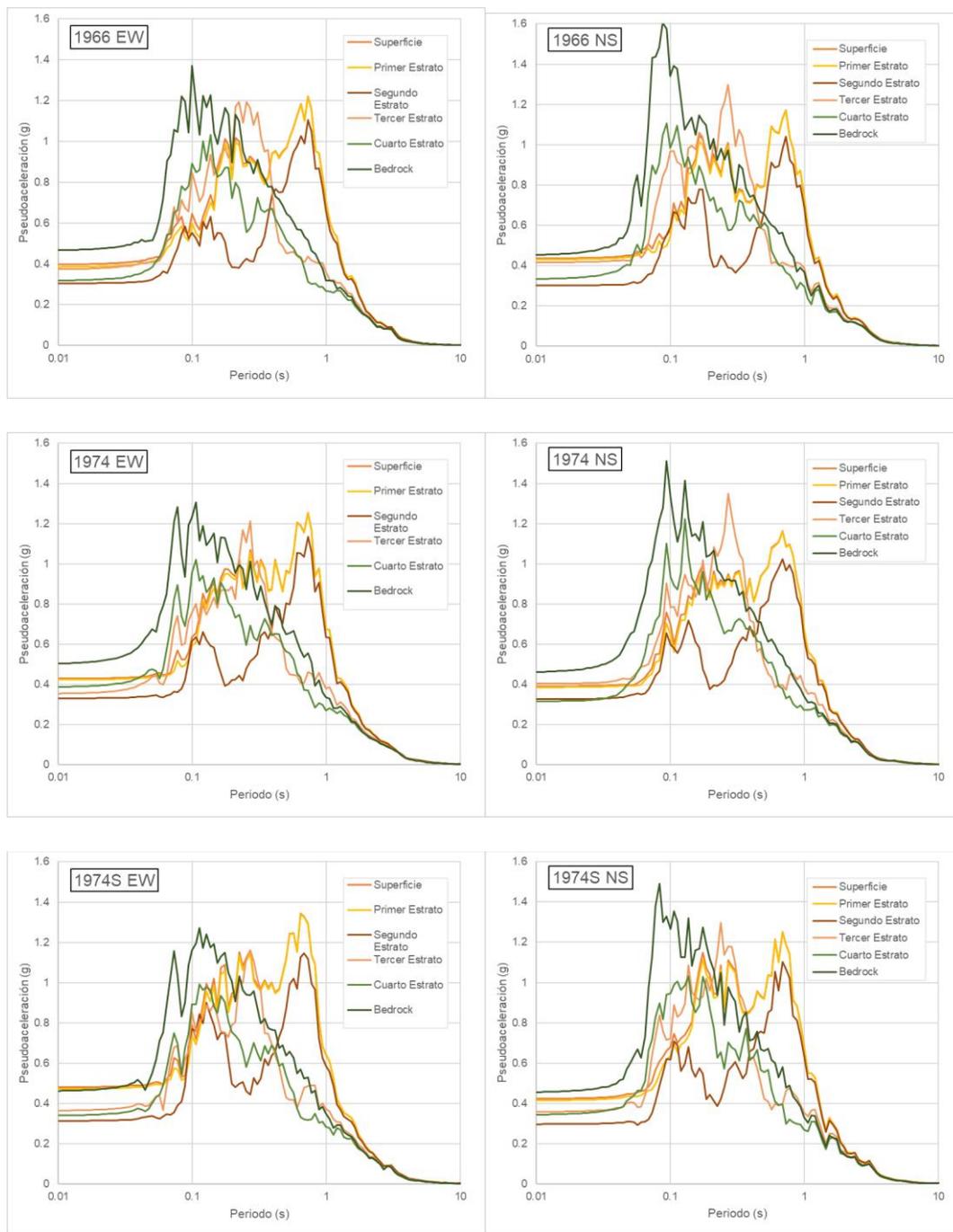
Espectro de Respuesta en función de la profundidad del Arreglo A-01.

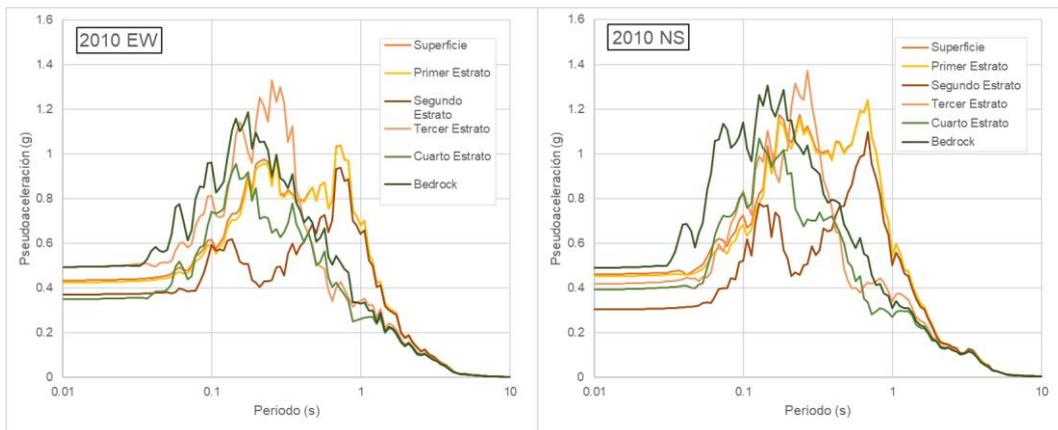
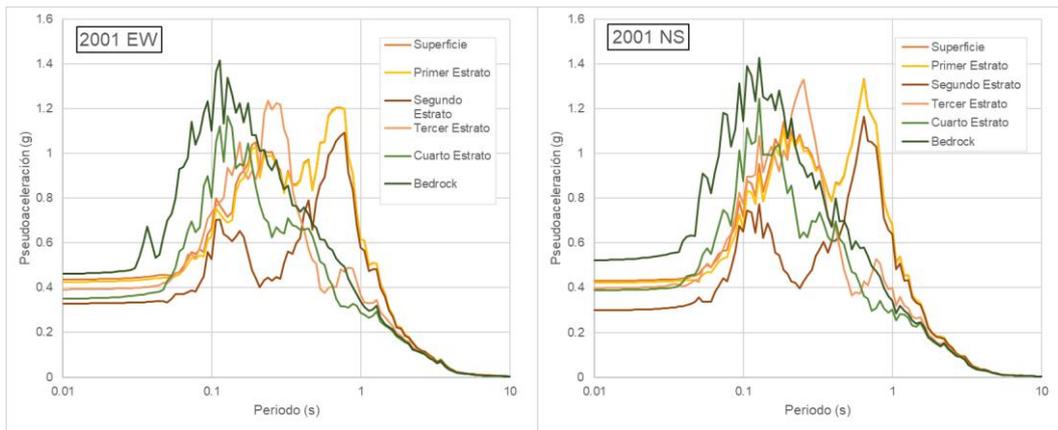




Anexo 15: Espectro de Respuesta A-01-Perfil

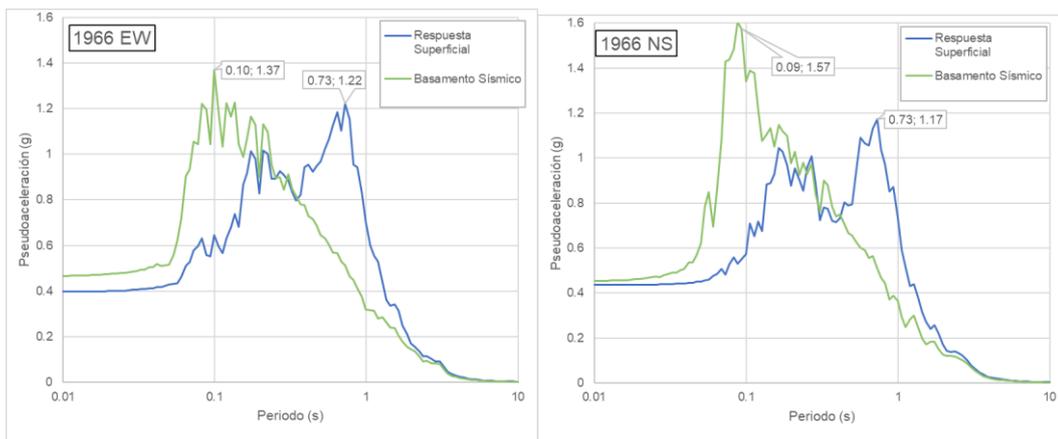
Espectro de Respuesta en cada estrato del perfil del Arreglo A-01.

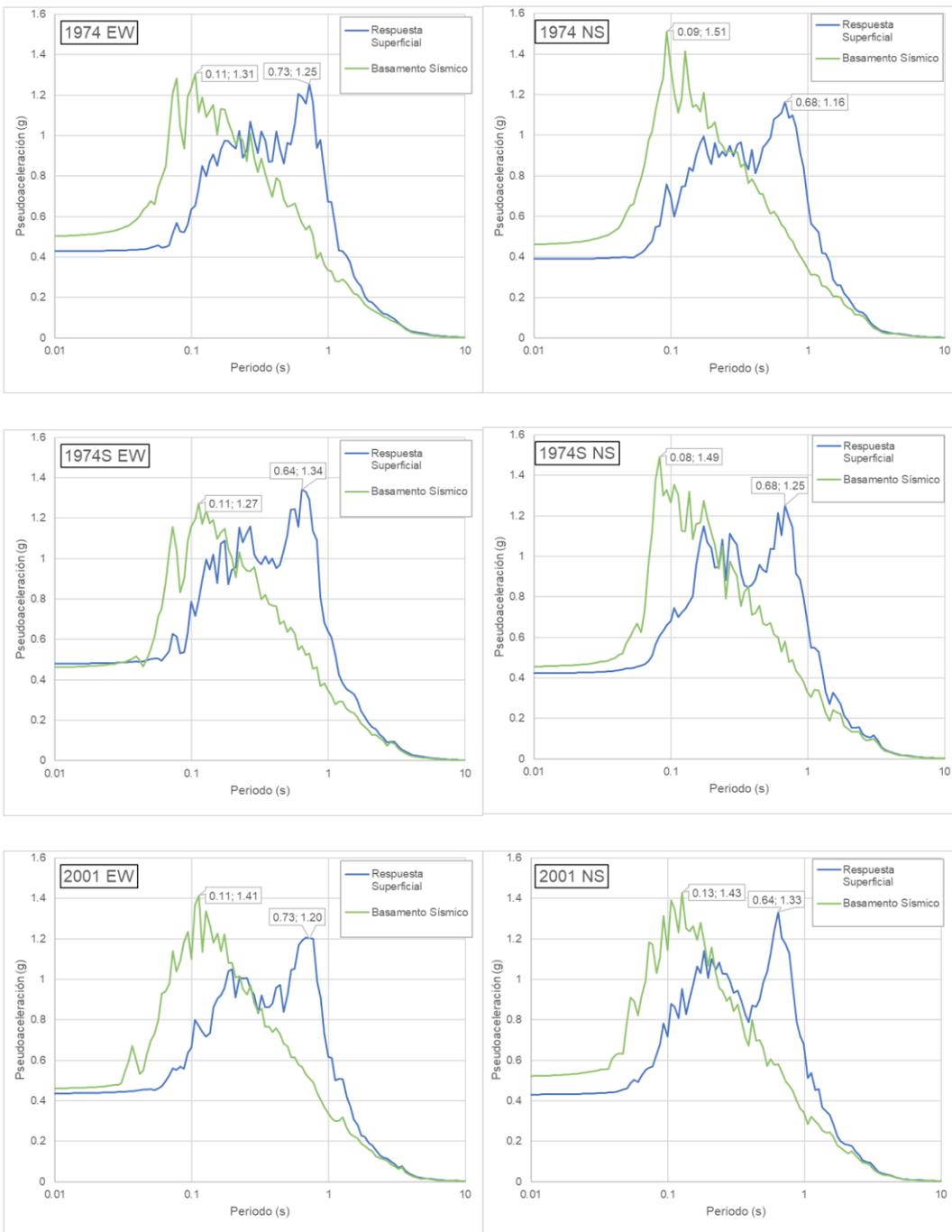


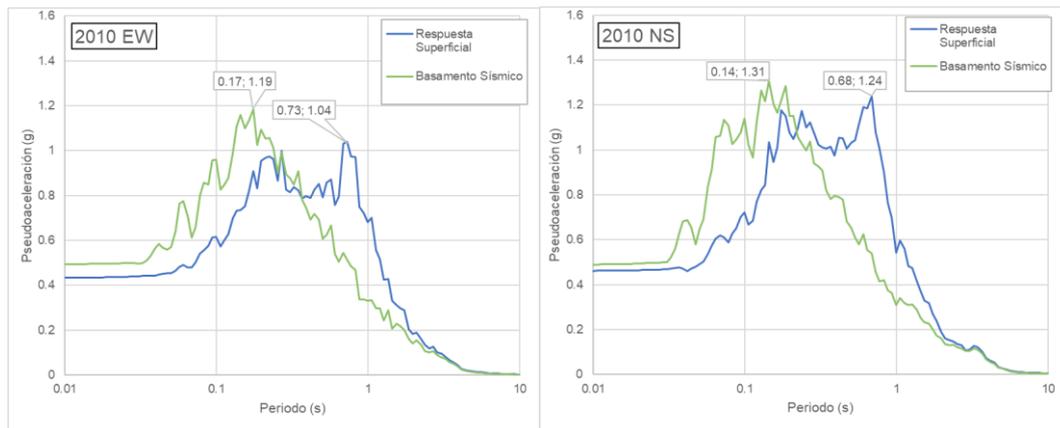


Anexo 16: Espectro de Respuesta en Superficie A-01.

Espectro de Respuesta en Superficie y Basamento Sísmico del Arreglo A-01.

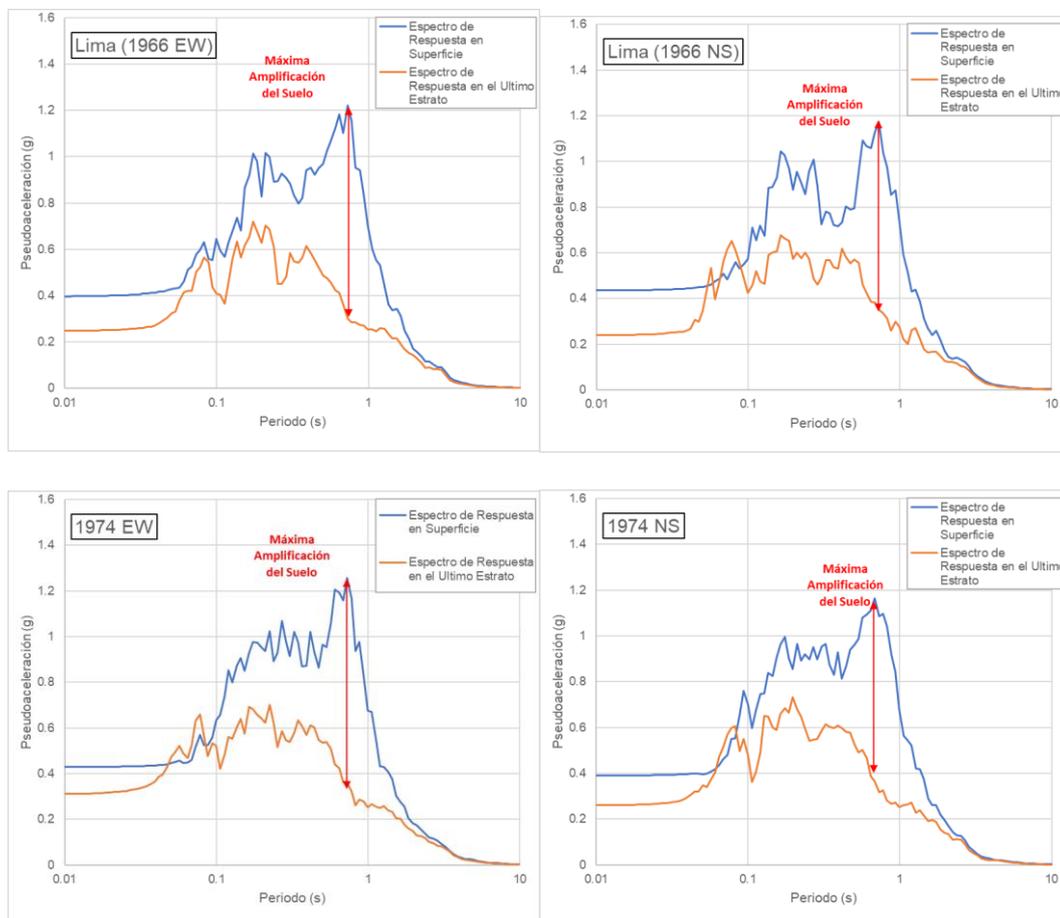


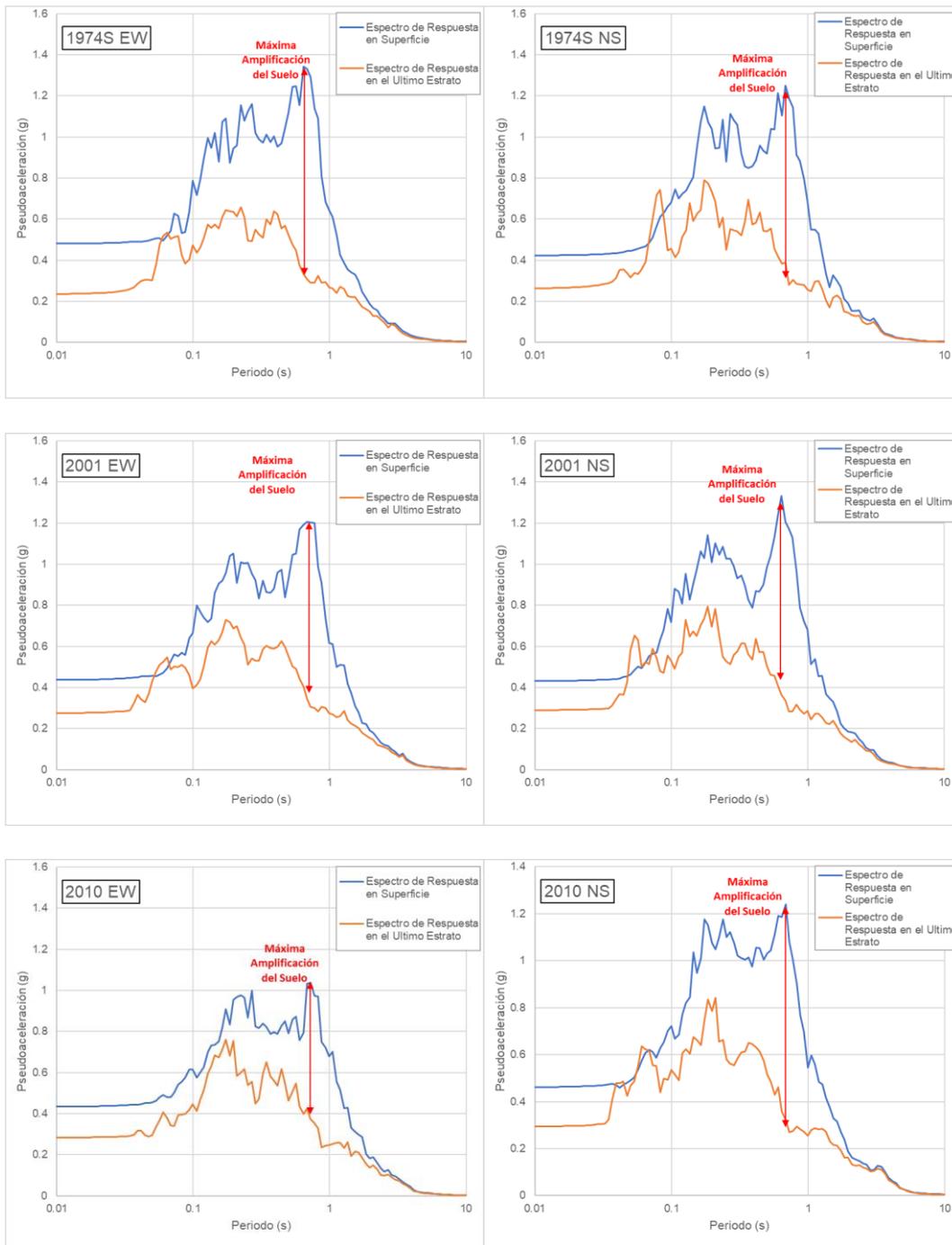




Anexo 17: Máxima Amplificación del Suelo A-01.

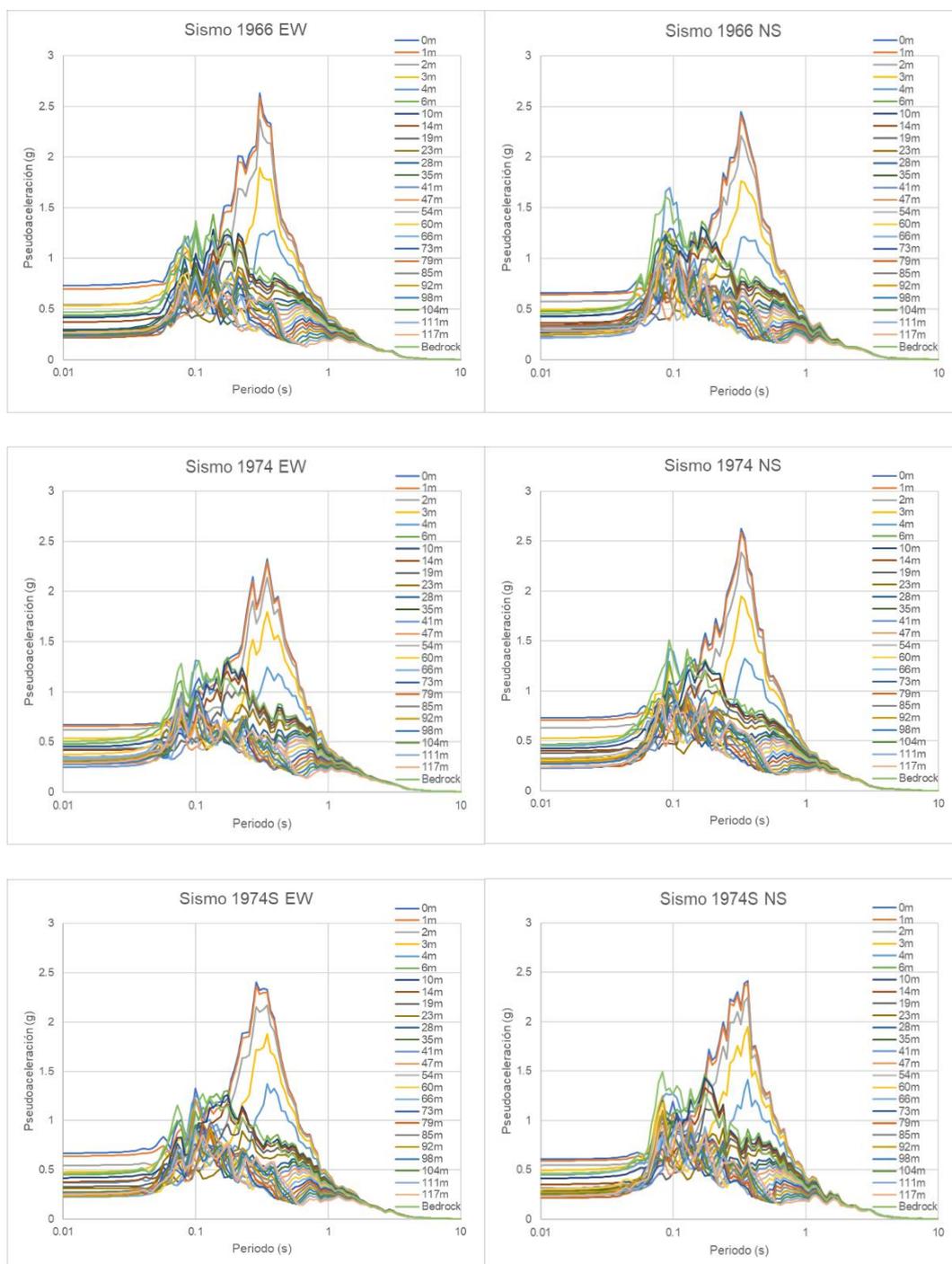
Máxima Amplificación del Suelo del Análisis de Amplificación del Arreglo A-01.

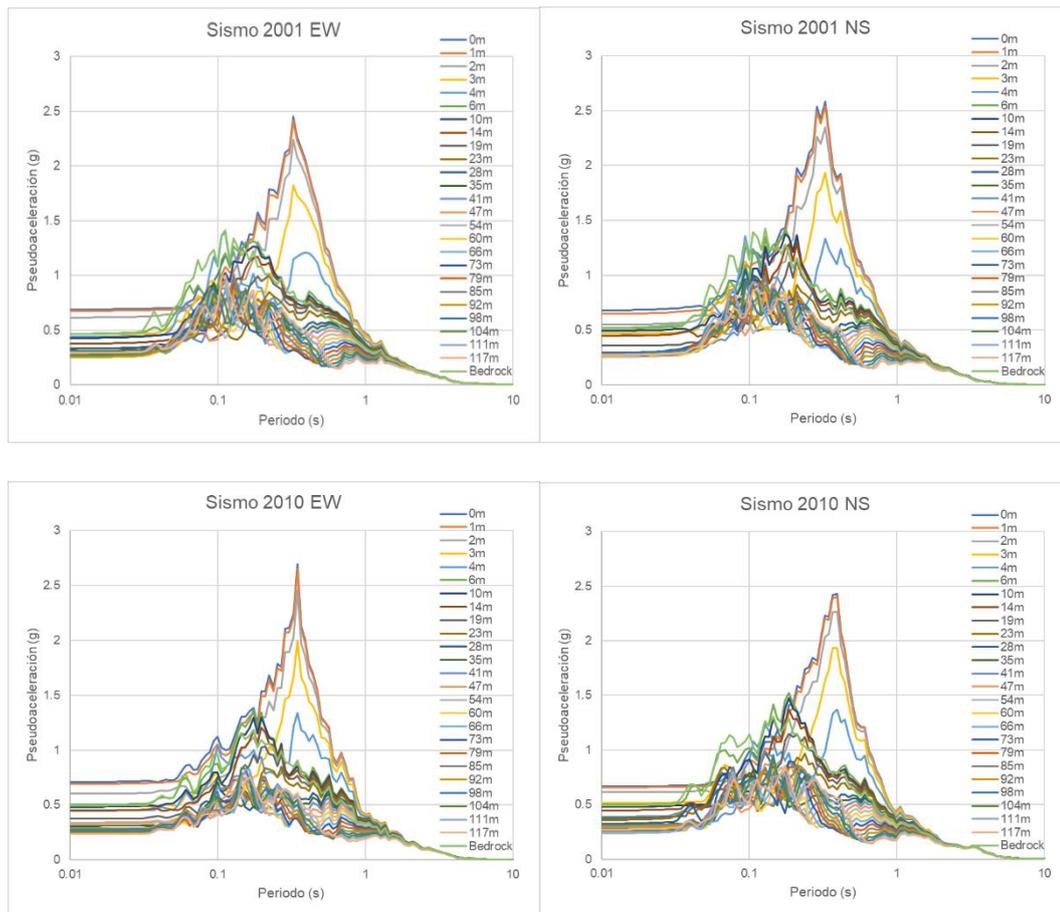




Anexo 18: Espectro de Respuesta A-02-Prof.

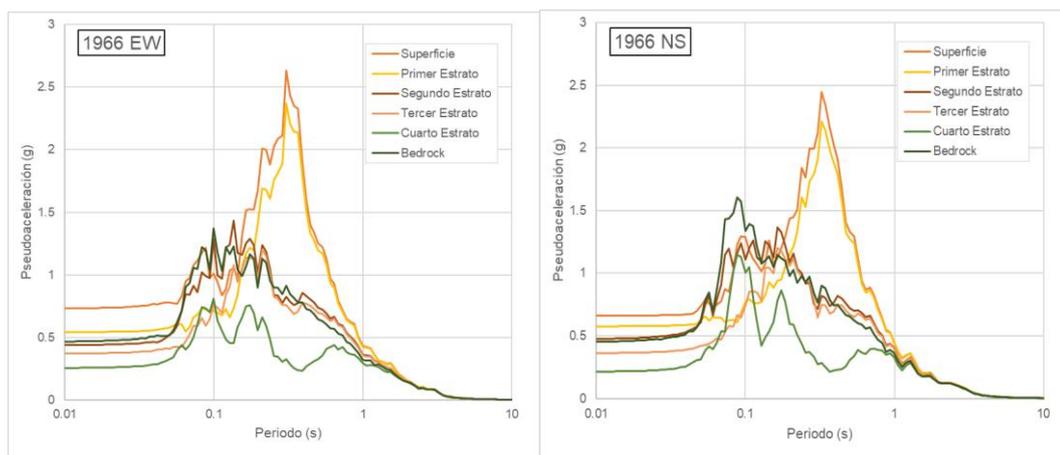
Espectro de Respuesta en función de la profundidad del Arreglo A-02.

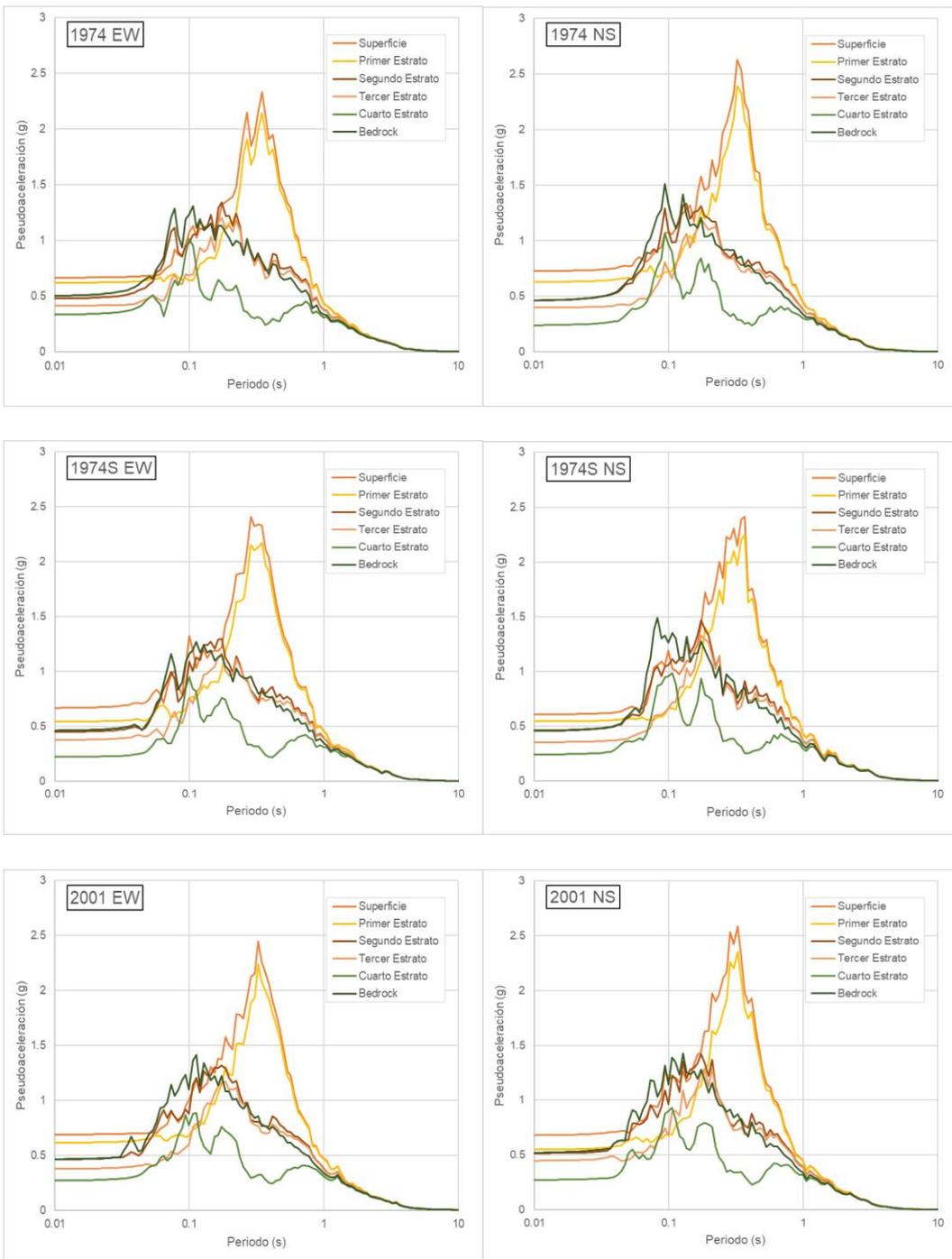


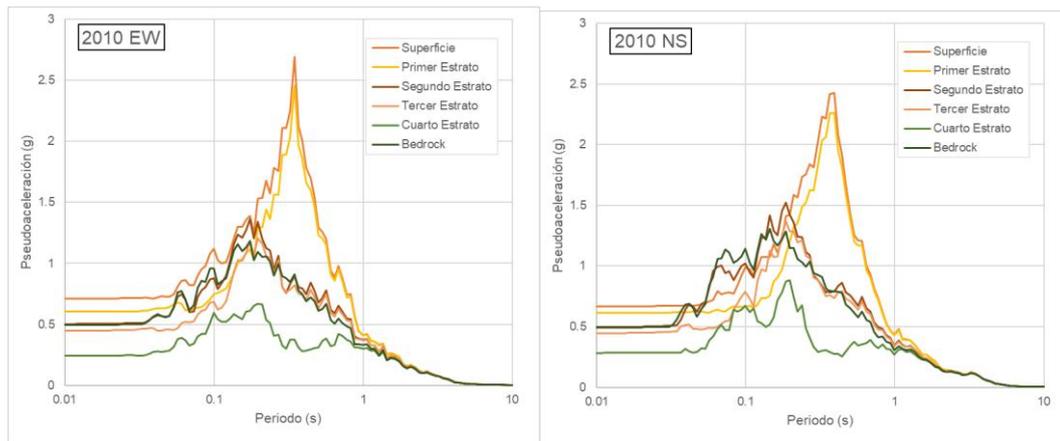


Anexo 19: Espectro de Respuesta A-02-Perfil

Espectro de Respuesta en cada estrato del perfil del Arreglo A-02.

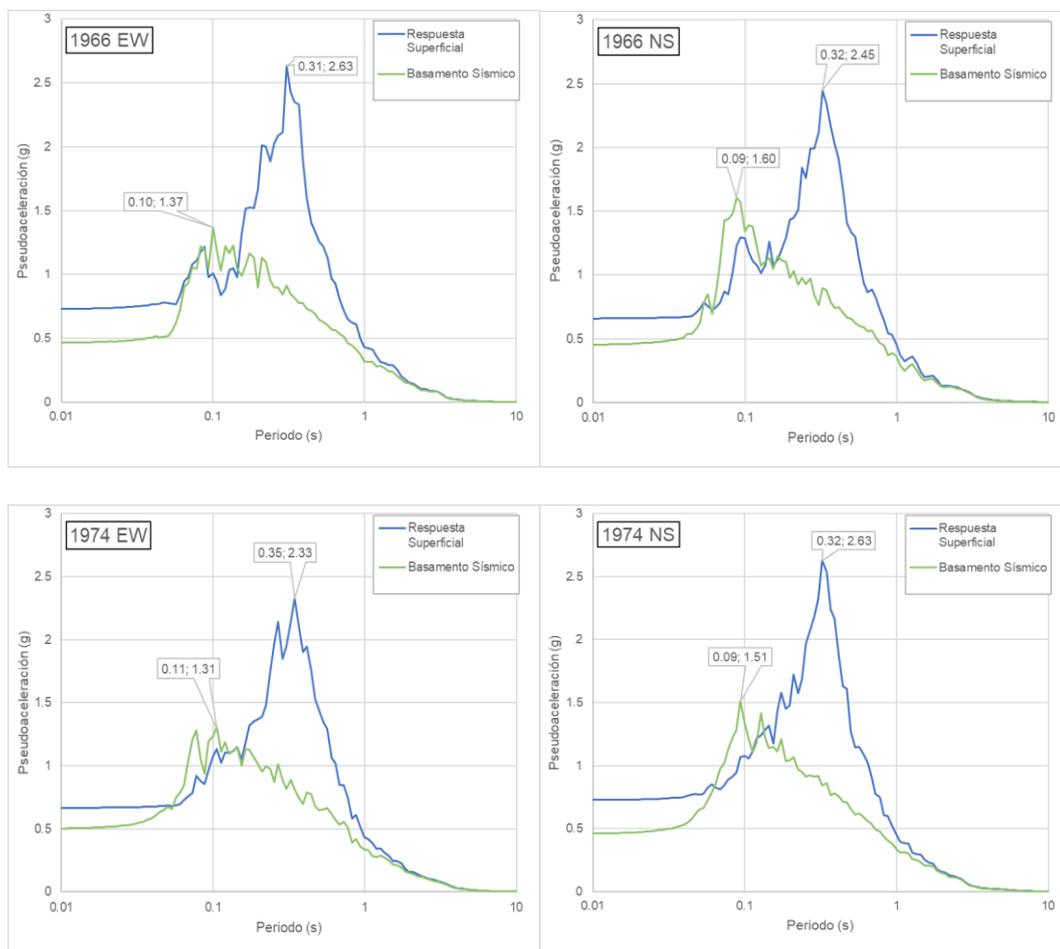


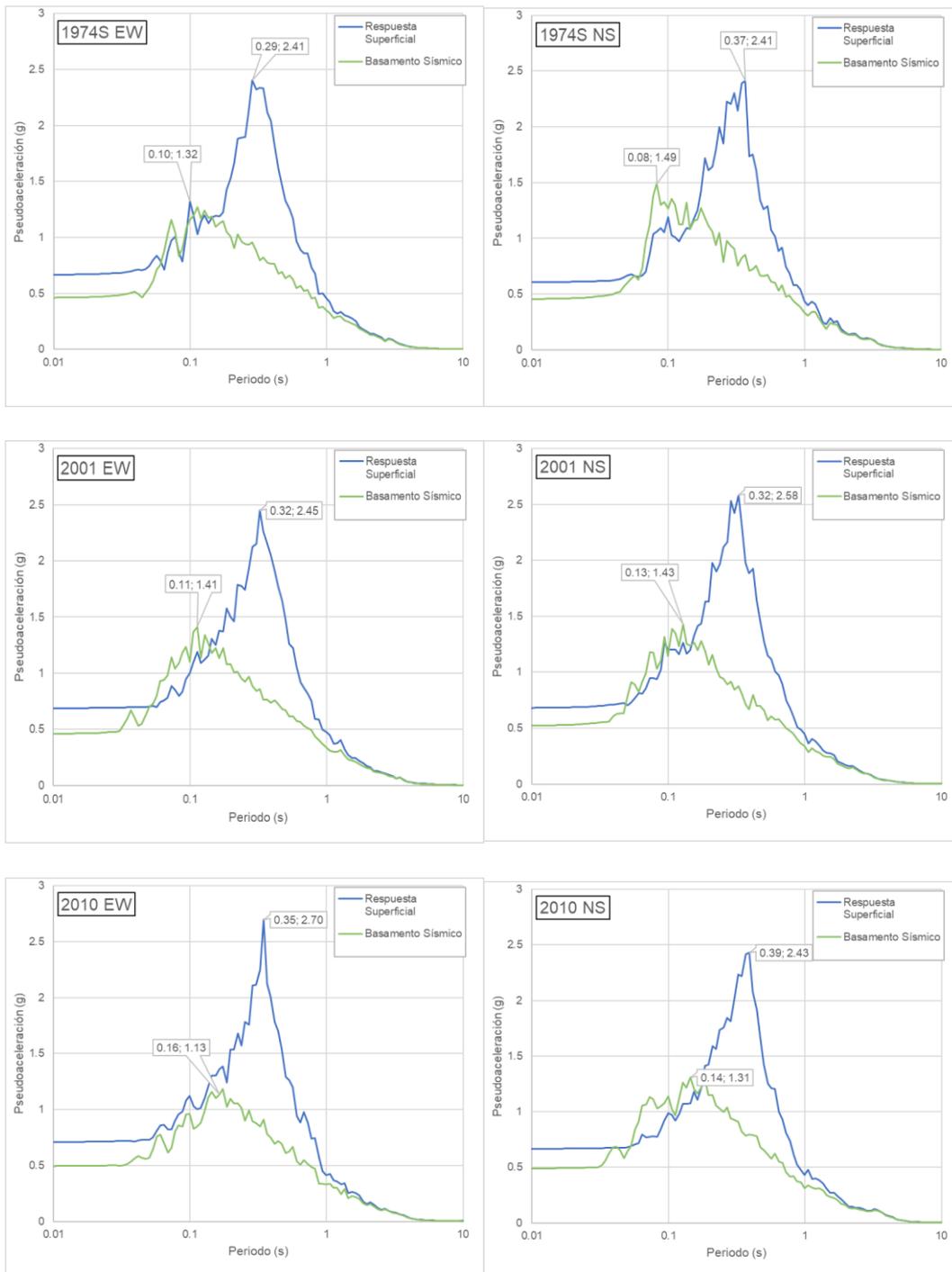




Anexo 20: Espectro de Respuesta en Superficie A-02.

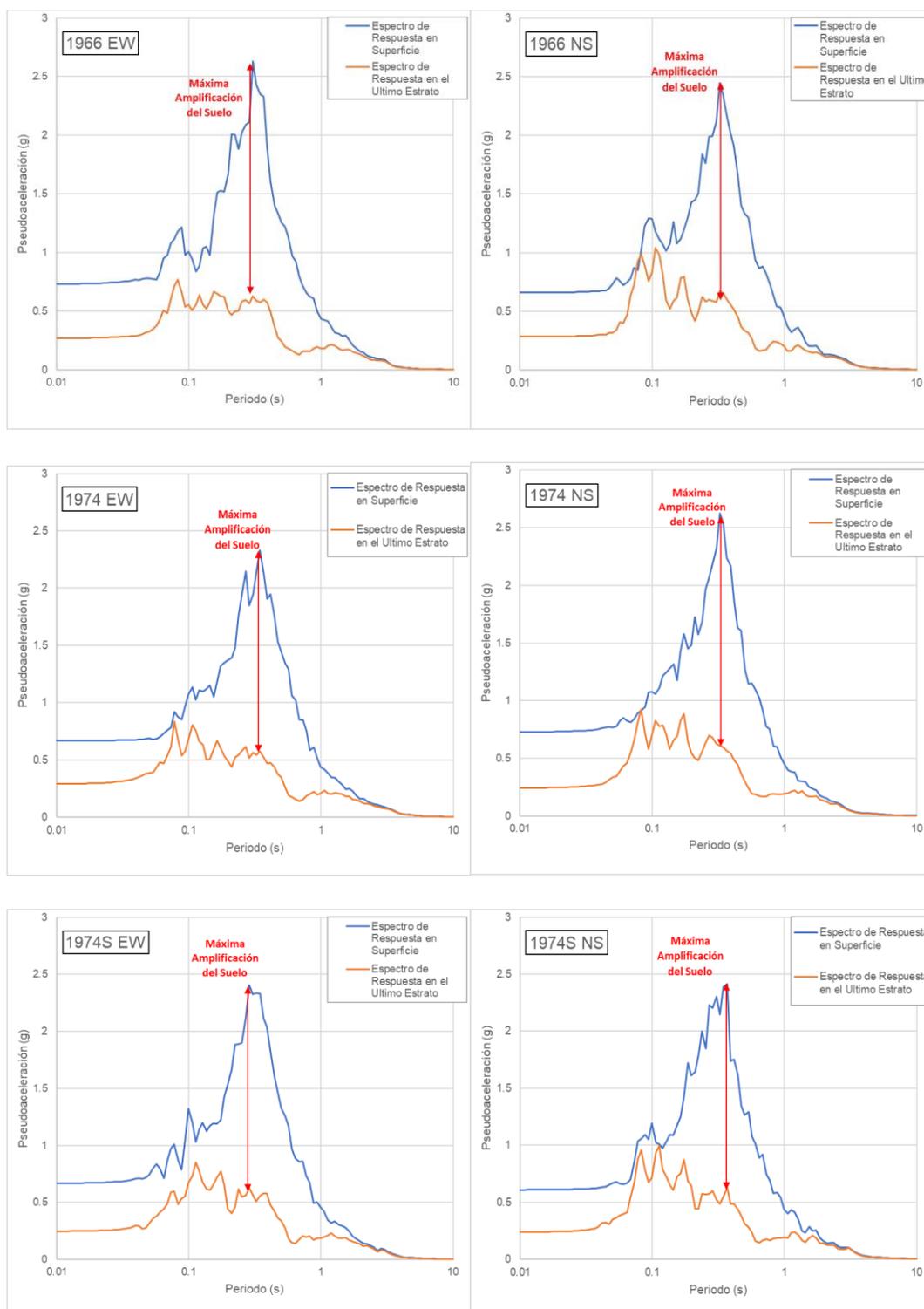
Espectro de Respuesta en Superficie y Basamento Sísmico del Arreglo A-02.

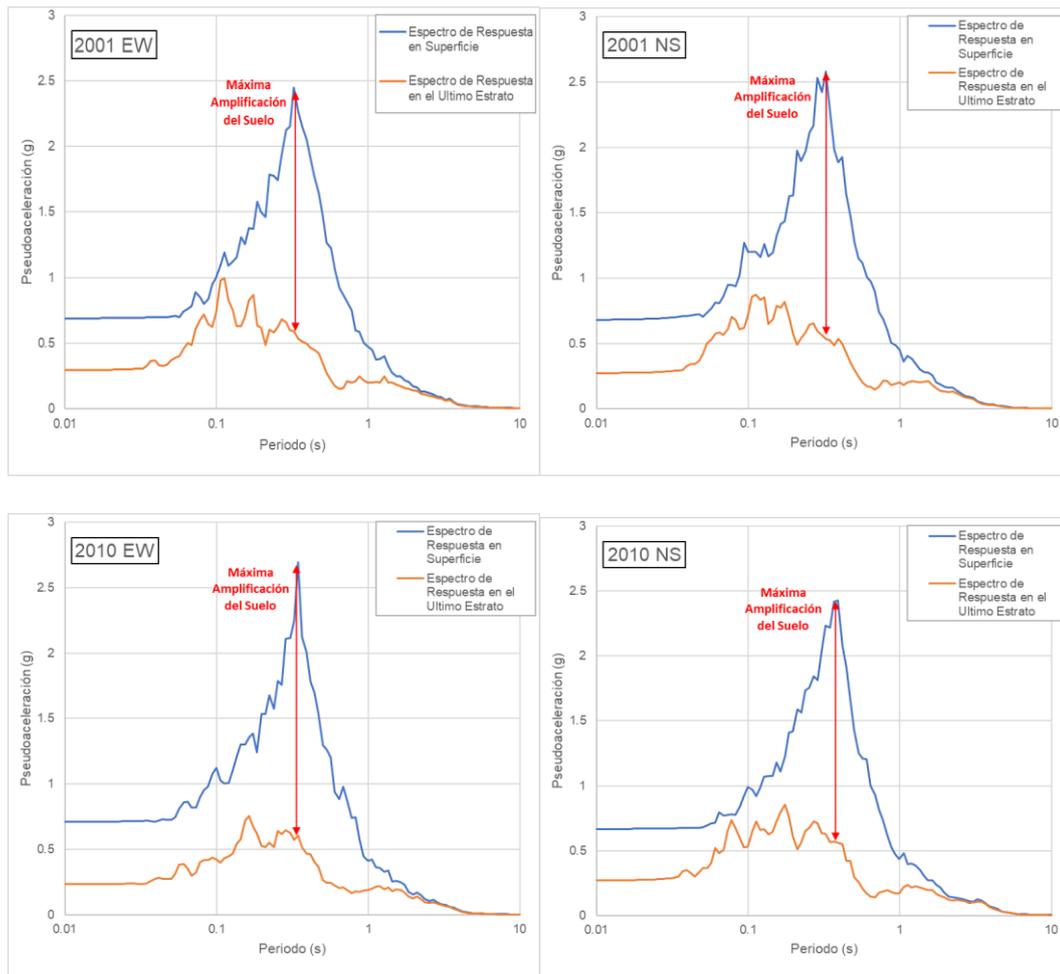




Anexo 21: Máxima Amplificación del Suelo A-02.

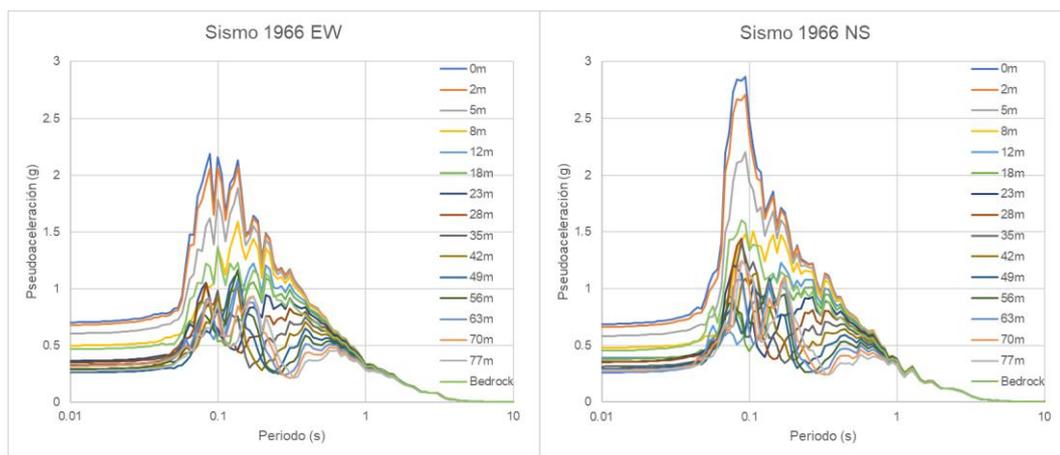
Máxima Amplificación del Suelo del Análisis de Amplificación del Arreglo A-02.

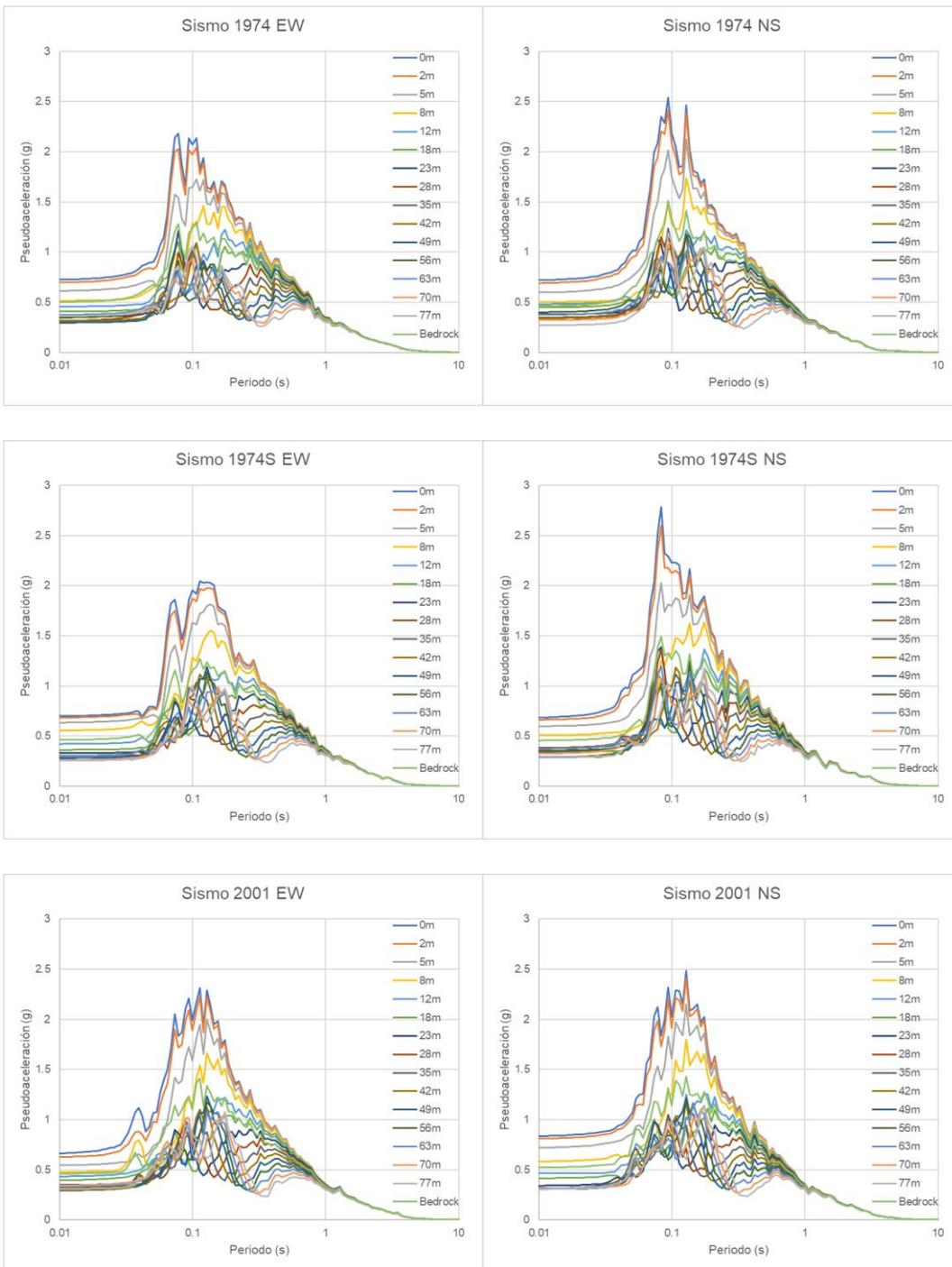


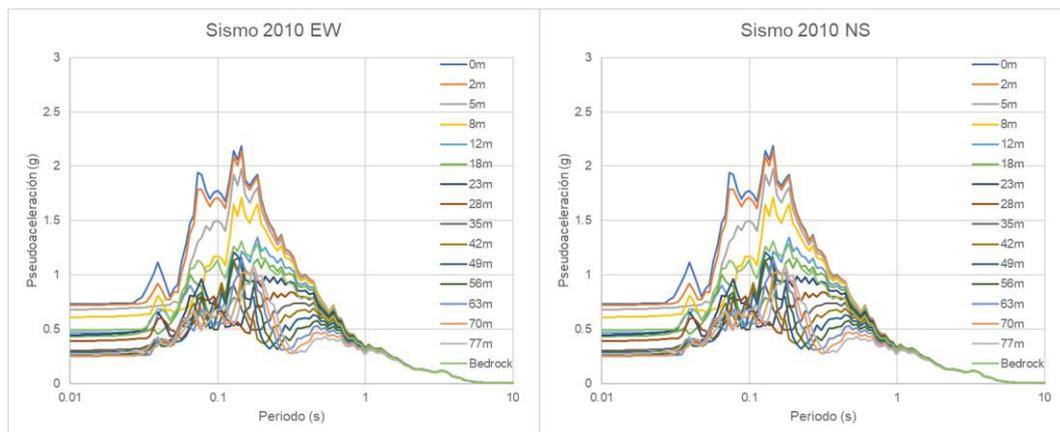


Anexo 22: Espectro de Respuesta A-03-Prof.

Espectro de Respuesta en función de la profundidad del Arreglo A-03.

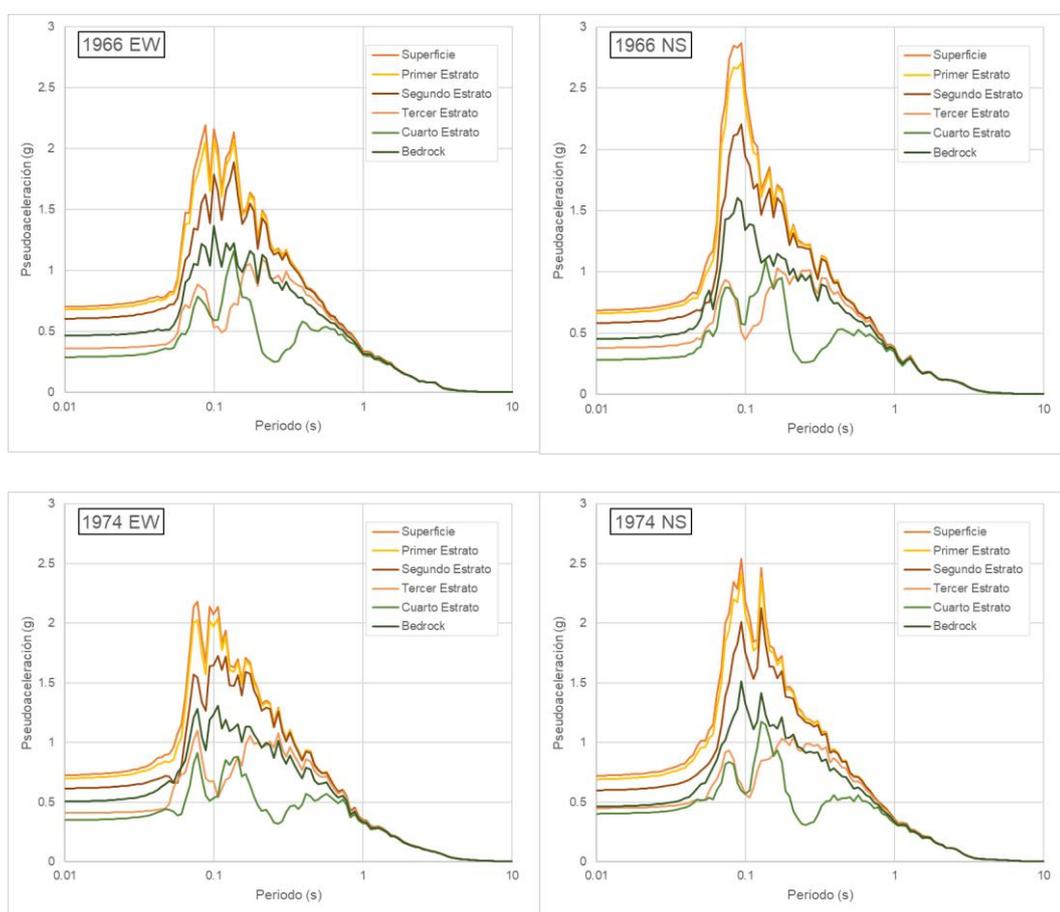


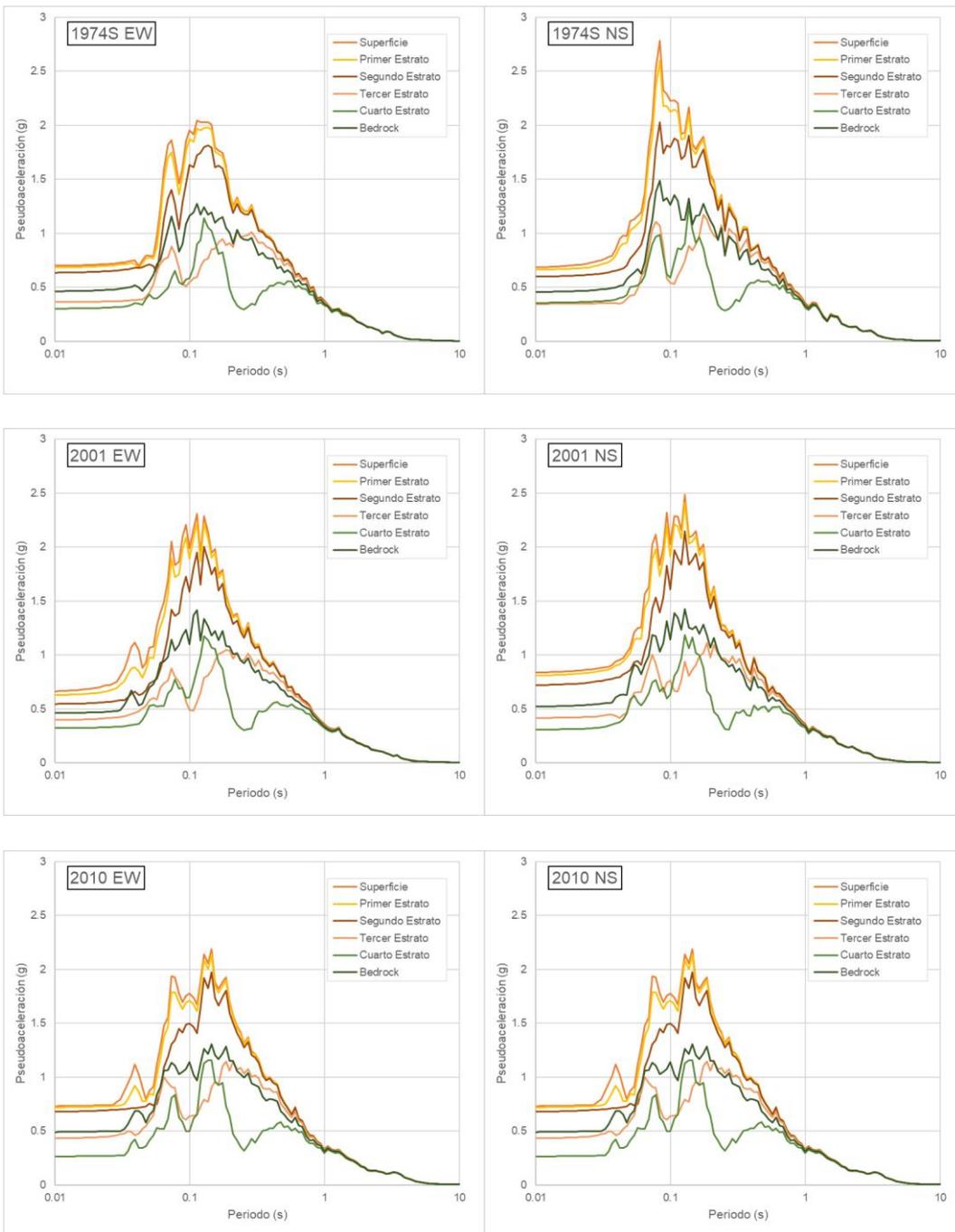




Anexo 23: Espectro de Respuesta A-03-Perfil

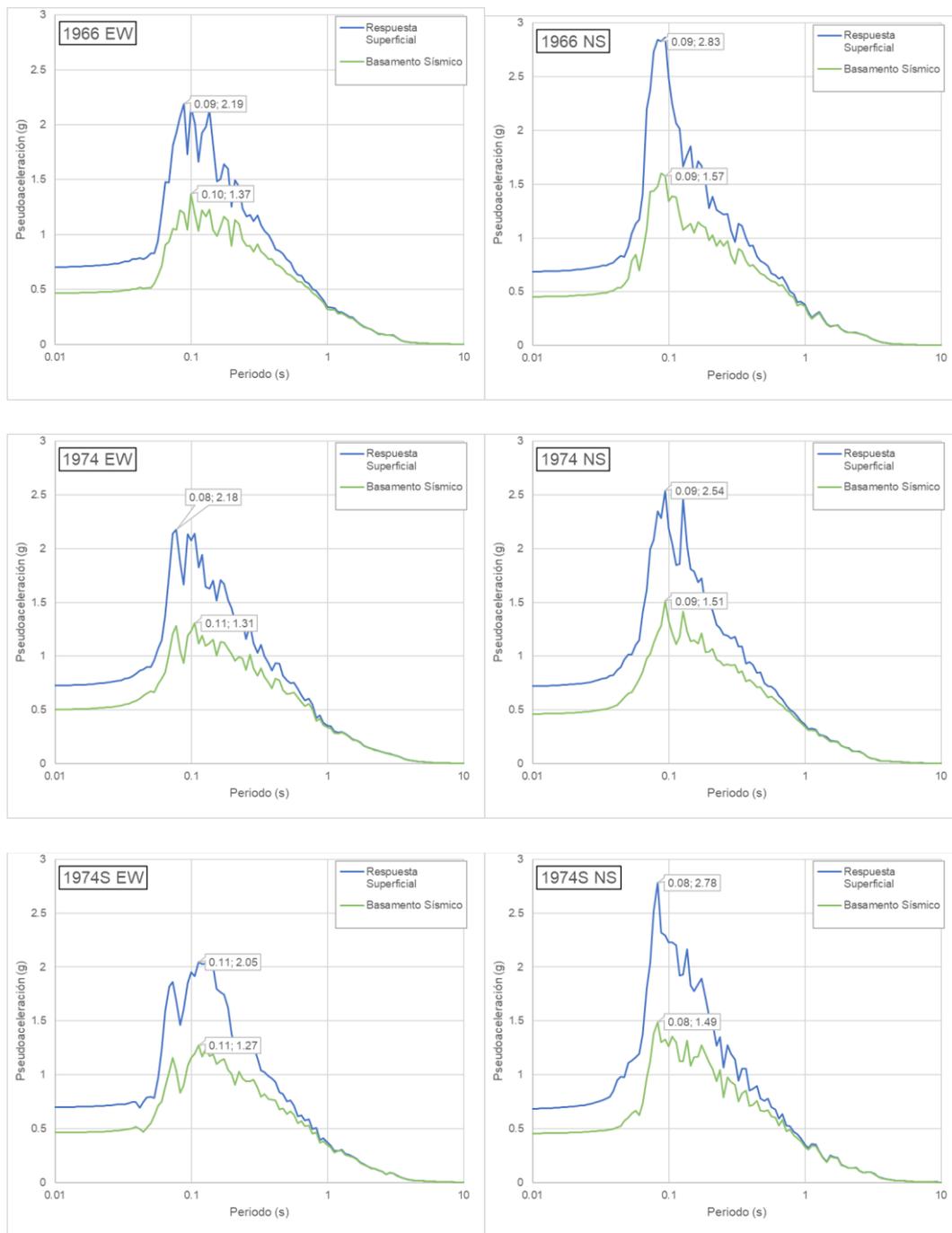
Espectro de Respuesta en cada estrato del perfil del Arreglo A-03.

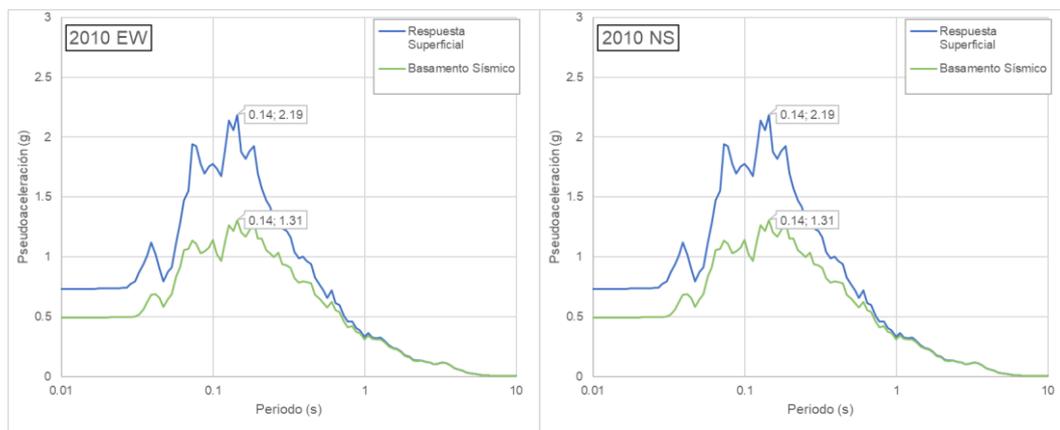
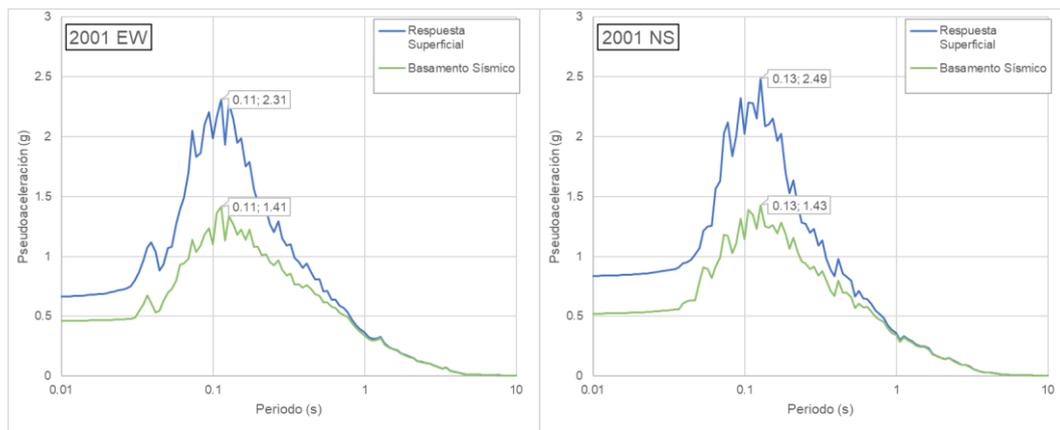




Anexo 24: Espectro de Respuesta en Superficie A-03.

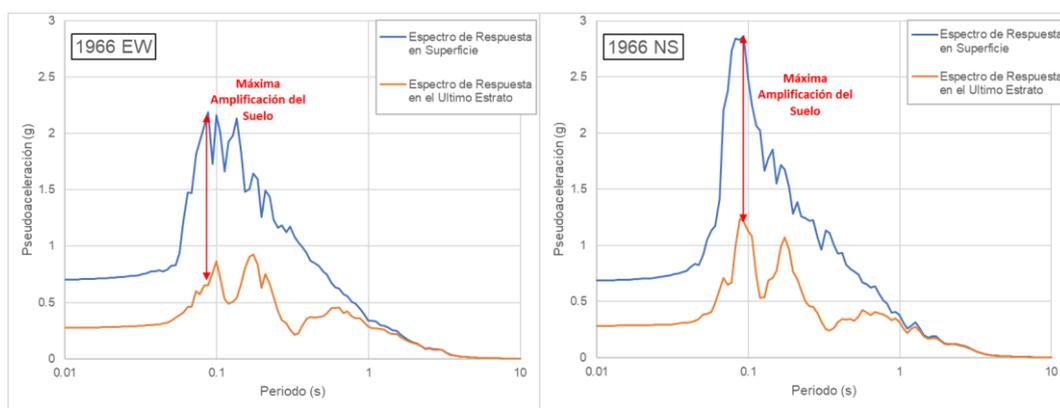
Espectro de Respuesta en Superficie y Basamento Sísmico del Arreglo A-03.

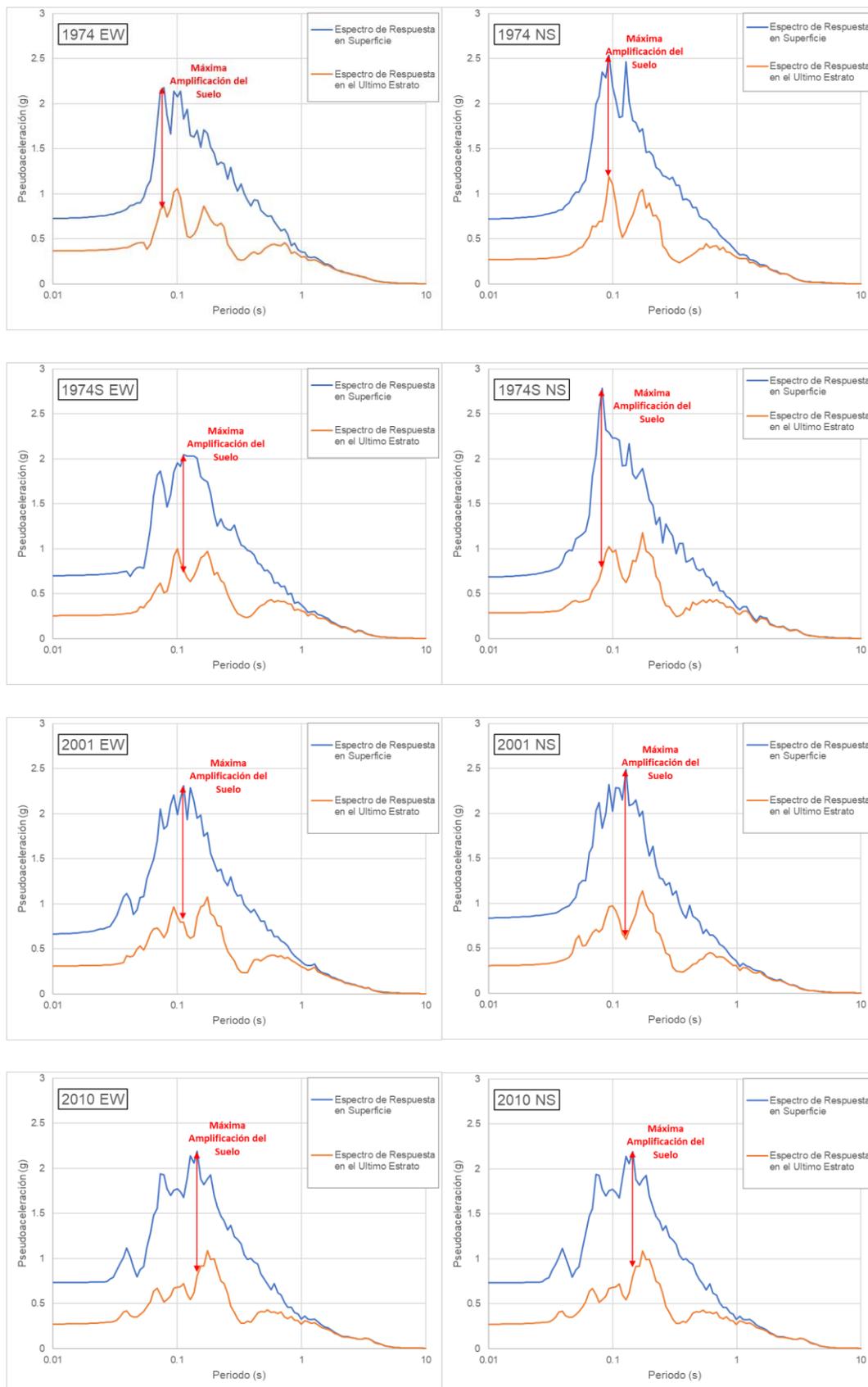




Anexo 25: Máxima Amplificación del Suelo A-03.

Máxima Amplificación del Suelo del Análisis de Amplificación del Arreglo A-03.





Anexo 26: Valores Promedio de PGA, Desplazamiento y Deformación.

A-01				
Profundidad (m)	PGA (g)	Desplazamiento (m)	Profundidad (m)	Deformación (%)
0.0	0.48	0.058	0.80	0.009
1.6	0.48	0.057	2.39	0.031
3.2	0.45	0.057	3.98	0.057
4.8	0.41	0.056	5.98	0.082
7.2	0.35	0.055	8.39	0.145
9.6	0.36	0.052	10.80	0.219
12.0	0.38	0.048	13.21	0.316
14.4	0.41	0.041	15.62	0.396
16.8	0.47	0.033	18.03	0.510
19.2	0.55	0.023	20.95	0.088
22.7	0.52	0.021	24.38	0.111
26.1	0.44	0.018	27.81	0.141
29.5	0.46	0.014	31.24	0.155
33.0	0.52	0.010	35.86	0.014
38.8	0.48	0.009	41.67	0.017
44.6	0.41	0.009	47.48	0.021
50.4	0.34	0.008	53.29	0.024

A-02				
Profundidad (m)	PGA (g)	Desplazamiento (m)	Profundidad (m)	Deformación (%)
0.0	0.74	0.062	0.48	0.034
1.0	0.72	0.062	1.43	0.172
1.9	0.65	0.061	2.38	0.431
2.9	0.57	0.058	3.33	0.816
3.8	0.51	0.052	4.28	1.143
4.8	0.56	0.044	6.37	0.027
8.0	0.52	0.044	10.12	0.015
12.3	0.48	0.043	14.38	0.025
16.5	0.42	0.042	18.64	0.036
20.8	0.37	0.041	22.90	0.075
25.0	0.37	0.039	28.20	0.017
31.4	0.36	0.038	34.54	0.020
37.7	0.33	0.037	40.88	0.022
44.1	0.32	0.036	47.22	0.024
50.4	0.33	0.035	53.56	0.026
56.7	0.32	0.034	59.90	0.028
63.1	0.31	0.032	66.24	0.030

A-03				
Profundidad (m)	PGA (g)	Desplazamiento (m)	Profundidad (m)	Deformación (%)
0.0	0.83	0.022	0.74	0.007
1.5	0.81	0.022	2.22	0.024
3.0	0.73	0.022	4.58	0.018
6.2	0.64	0.021	7.82	0.035
9.4	0.52	0.021	12.16	0.013
14.9	0.47	0.020	17.60	0.017
20.3	0.43	0.020	23.04	0.020
25.8	0.40	0.019	28.48	0.023
31.2	0.37	0.019	34.73	0.017
38.3	0.38	0.018	41.79	0.018
45.3	0.38	0.017	48.85	0.020
52.4	0.39	0.017	55.91	0.021
59.4	0.38	0.016	62.97	0.023
66.5	0.35	0.015	70.03	0.025
73.6	0.32	0.015	77.09	0.026