

ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

**Capacitación en Microzonificación Sísmica y  
Mapas de Escenarios Sísmicos en Zonas Urbanas.  
Caso de Estudio: La Molina, Lima, Perú**

---



**PROFESOR DEL CURSO:** Mtro. Ing. Javier Francisco Lermo Samaniego

**ASISTENTE:** Mg. Ing. Julio Ríos León

**INTEGRANTES:**

Esquivel Zavala, Cristhian  
Huertas Martell, José Cristhian  
Huisa Condori, Cristian  
Mesa Campos, Fiorella  
Morales Guerrero, Astrid Stephanie  
Ninanya Calderón, Stevens Junior  
Ramos Brast, Carlos Eduardo  
Salcedo Chahud, Carlos Augusto  
Vílchez Deza, Lino Eduardo

**REVISORES INTERNOS:**

Dra. Sandra Santa Cruz Hidalgo      M.I. Antonio Zeballos Cabrera

**Lima agosto, 2019**

## Índice de contenido

1	Resumen ejecutivo	3
2	Introducción	5
3	Objetivos	5
4	Alcances	6
5	Antecedentes	6
5.1	Regionalización y zonificación sísmica del Perú	6
5.2	Microzonificación del distrito de La Molina	7
6	Marco teórico	13
6.1	Conceptos sobre Dinámica de Suelos	13
6.2	Método de Haskell-Thompson	15
6.3	Funciones de Transferencia	15
6.3.1	<i>Funciones de Transferencia Teórica (FTT)</i>	16
6.3.2	<i>Funciones de Transferencia Empírica (FTE)</i>	17
6.3.3	<i>Amplificación Sísmica</i>	18
7	Evaluación del efecto de sitio para la microzonificación	19
7.1.	Levantamiento de datos de campo	19
7.2	Procesamiento de datos	25
7.3	Desarrollo de los mapas de isoperíodos, amplificación relativa e isopacas para el distrito de La Molina	30
8	Escenarios sísmicos	34
8.1	Estación Acelerográfica PQR y LIM01	34
8.2	Procedimiento para obtener los acelerogramas en roca de estos dos terremotos	35
8.3	Procedimiento para la determinación de acelerogramas sintéticos para cada uno de los 28 puntos analizados.	37
8.4	Mapas de intensidad sísmica o aceleraciones máximas del suelo y estructuras con $T=0.2$ y $0.4$ segundos para los terremotos de 1966 y 2019	38
8.5	Factores de Amplificación	41
8.5.1	Factores de amplificación respecto a valores en roca	41
8.5.2	Factores de amplificación respecto a PGA	42
9	Discusión de resultados	43
10	Conclusiones y recomendaciones	50
11	Agradecimientos	50
12	Referencias	51
13	Anexos	52

## 1 RESUMEN EJECUTIVO

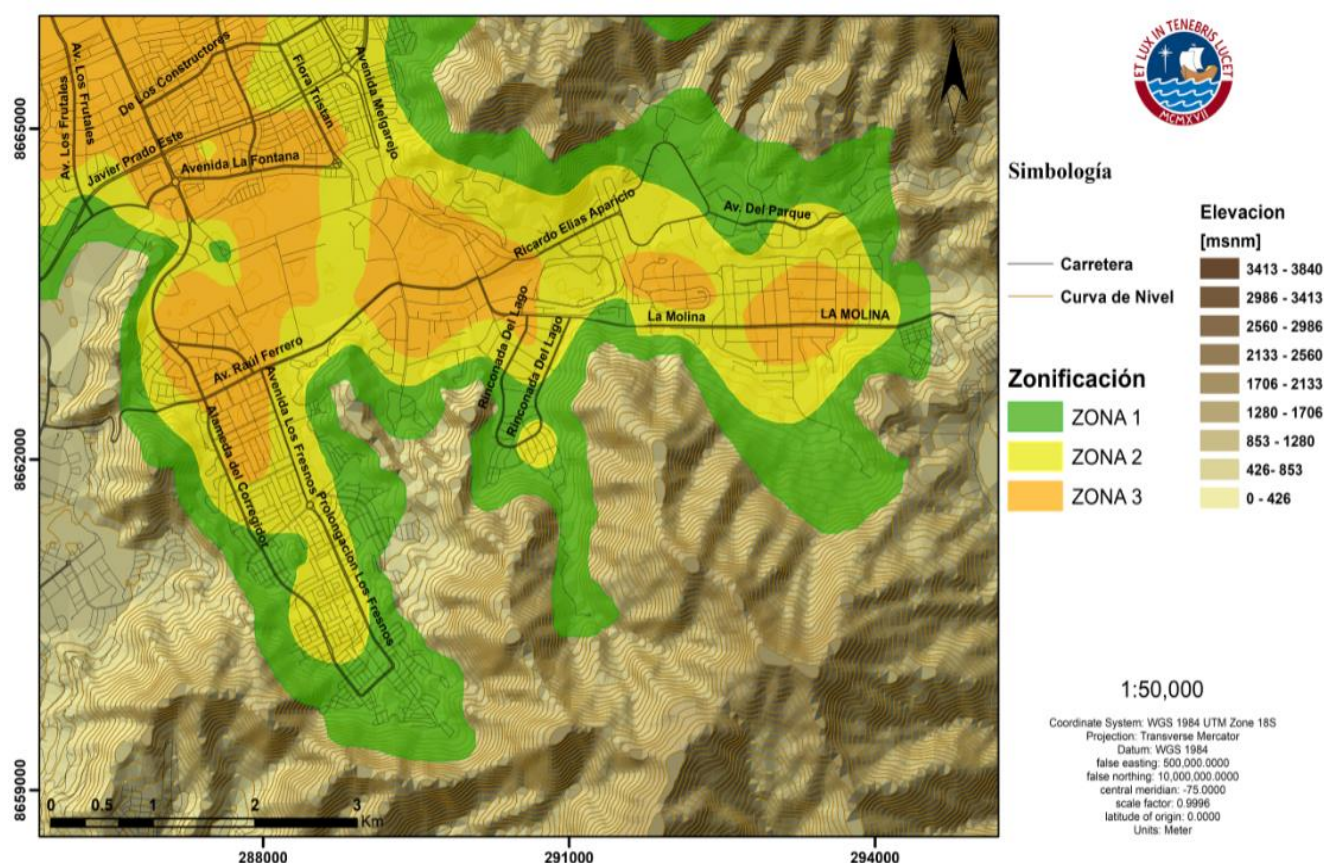
El informe presenta el estudio de microzonificación sísmica, caracterización de terrenos para diseño sísmico y determinación de mapas de intensidad sísmica en el distrito de La Molina, Lima, Perú. Se presenta un nuevo *mapa de microzonificación sísmica* cuyos límites son las curvas de igual periodo: **Zona de Lomas:** Abarca todos los cerros y lomeríos y bordean a la zona I o zona de transición de color verde, cuyos límites es la curva de igual periodo de 0.0 segundos; **Zona I o Zona de Transición:** Conformada por las laderas de los cerros donde existen afloramientos rocosos o estratos gravosos de origen coluvial de pequeño espesor, dividida entre las curvas de igual periodo de 0.0 a 0.1 segundos, con amplificaciones relativas de hasta de 2 veces y espesores de suelo hasta aproximadamente 10 metros arriba de los depósitos de conglomerado; **Zona II o Zona Baja A:** Zona relativamente plana, que se extiende desde el pie de las laderas hacia la zona del valle, conformada predominantemente por suelos gravosos coluviales y estratos de arena mal graduada, dividida entre las curvas de igual periodo de 0.1 a 0.3 segundos, con amplificaciones relativas de hasta de 4 veces y espesores de suelo hasta aproximadamente 25 metros arriba de los depósitos de conglomerado; **Zona III o Zona Baja B:** Zona que abarca la parte central y más profunda de valle, conformado mayormente por suelos finos y arenosos de gran potencia, dividida entre las curvas de igual periodo de 0.3 a 0.8 segundos, con amplificaciones relativas de hasta de 13 veces y espesores de suelo hasta aproximadamente 70 metros arriba de los depósitos de conglomerado.

Se generaron mapas de aceleraciones del suelo (PGA) con los sismos de 1966 (8.1 Mw) y Lagunas 2019 (8.0 Mw), así como también mapas de aceleración para construcciones con periodos estructurales de 0.2 y 0.4 segundos, viviendas típicas abundantes en el distrito. Con estos valores se desarrollaron **mapas de factor de amplificación**, utilizando el cociente de la aceleración estructural para los periodos  $T=0.2$  seg y  $T=0.4$  seg respecto a las aceleraciones del suelo (PGA) en los 28 puntos de estudio, con el objeto de validar en el distrito de La Molina el factor de amplificación sísmica del espectro de diseño propuesto por la norma E.030: 1) De acuerdo con la norma E030, el factor de amplificación sísmica  $C$  para un suelo tipo S2 en períodos estructurales menores a 0.6 segundos debería ser de 2.5. Sin embargo, los valores encontrados de dividir  $S_a$  ( $T<0.6s$ ) /  $PGA(T=0.0s)$  distan de este valor indicado en la norma. Para el caso de estudio, este cociente está en el orden de 2.94; es decir, 18% más alto que en la norma sísmica peruana; 2). A su vez, en la misma norma E030, para la Zona 4 (este trabajo Zona III o Zona Baja B), el factor de suelo S2 (1.05) es 1.31 veces el factor de la roca S0 (0.80), realizando el mismo cálculo para el presente informe, se obtiene que el factor de suelo es de 1.39. Por lo tanto, este valor, si bien es mayor al de la norma, puede ser considerado como equivalente en términos de ingeniería.

Respecto al escenario sísmico de 1966, la aceleración máxima del suelo resulta  $305 \text{ cm/s}^2$  ( $0.31g$ ) el cual se produce en la zona III según CISMID. Considerando el informe de vulnerabilidad del CISMID, la vivienda predominante en el distrito de la Molina es una estructura de mampostería con diafragma rígido de dos pisos. Entonces asumiendo un periodo estructural de 0.2s para estas viviendas, el sismo involucra una aceleración espectral promedio de  $500 \text{ cm/s}^2$  (ver figuras 52 y 53). Ahora, si comparamos el mapa de aceleraciones PGA para el sismo de 1966 obtenido en este estudio versus el mapa de aceleraciones que muestra el CISMID para el distrito de La Molina, vemos que el mapa desarrolla por el CISMID sobre evalúa este valor y además muestra que toda la zona IV tiene ese sobre valor;

mientras que nuestro mapa muestra solo seis sitios tendrían ese valor de aproximadamente 300 gales si ocurriera nuevamente un sismo parecido al temblor de 1966. Por último, la microzonificación sísmica propuesta y la distribución espacial del número de pisos de las viviendas construidas en este distrito, resaltando que la zona de mayor vulnerabilidad en cuanto a las viviendas y que existe una gran probabilidad de que se produzca resonancia entre los modos de vibrar de las estructuras y del suelo es en la **Zona II o Zona Baja A**.

## Nuevo mapa de Microzonificación Sísmica para el distrito de La Molina, Lima, Perú.



### Descripción

Zona I o Zona de Transición: Representada en color verde, se encuentra dividida entre las curvas de igual periodo de 0.0 a 0.1 segundos; esta zona presenta valores de amplificación relativa hasta de 2 veces y espesores de suelo hasta aproximadamente 10 metros arriba de los depósitos de conglomerado.

Zona II o Zona Baja A: Representada en color amarillo, se encuentra dividida entre las curvas de igual periodo de 0.1 a 0.3 segundos; esta zona presenta valores de amplificación relativa hasta de 4 veces y espesores de suelo hasta aproximadamente 25 metros arriba de los depósitos de conglomerado

Zona III o Zona Baja B: Representada en color naranja, se encuentra dividida entre las curvas de igual periodo de 0.3 a 1.0 segundos; esta zona presenta valores de amplificación relativa hasta de 13 veces y espesores de suelo hasta aproximadamente 70 metros arriba de los depósitos de conglomerado



## 2 INTRODUCCIÓN

El distrito de La Molina es uno de los 43 distritos de la Provincia de Lima, localizados en el Departamento de Lima, Perú. Se ubica al Sureste de Lima Metropolitana y al igual que los demás se encuentra en peligro latente, debido a la brecha sísmica existente frente a sus costas que no libera energía (del orden de 8.0 Mw) desde 1974. Existen reportes de daños desde el sismo del 24 de mayo de 1940 (8.2 Mw) que catalogan al distrito como muy vulnerable debido a sus características geomorfológicas y tipos de suelos. La Molina presenta un comportamiento sísmico particular, con intensidades mayores que en otras zonas de la ciudad de Lima.

Según CISMID (2010), el distrito de La Molina se divide en 4 microzonas sísmicas según el comportamiento dinámico del suelo (figura 5). Este mapa de microzonificación sísmica, está desarrollado, en el mismo mapa de microzonificación geotécnica, solamente se le ha agregado valores de periodo dominante del suelo y su amplificación relativa en cada una de estas cuatro zonas.

Este trabajo tiene como objetivo general evaluar la existencia de estas cuatro microzonas sísmicas, mediante la construcción de mapas de isoperiodos, amplificación relativa e isopacas a partir de funciones de transferencia empíricas (FTE) del suelo obtenidas con registros de ruido ambiental o microtemores (NHVSR, *Noise Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), y registros de sismos (EHVSR, *Earthquake Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Con base en información previa sobre la geología, geomorfología, hidrología y otros estudios (tesis de licenciatura, Armando Sifuentes, 2012), se interpretan los resultados obtenidos y se desarrolla un nuevo mapa de microzonificación sísmica para este distrito, el cual será comparado con el mapa de microzonificación sísmica desarrollado para este distrito por el CISMID (2010).

El nuevo mapa de microzonificación sísmica para el distrito de La Molina, será también dividido en cuatro zonas sísmicas, que tendrán como límites las curvas de igual periodo y las de isopacas al estrato resistente, ya que una de las características de los suelos es su periodo dominante que no varía con el tiempo (Lermo et al., 2003, 2004), por tal razón la mayoría de las ciudades en el mundo lo utilizan en la prevención, para que los periodos de las estructuras no coincidan con los periodos dominantes del suelo, evitando así la resonancia y el daño a las construcciones (Mayoral et al., 2019, Franke et al., 2019).

Ademas, utilizando las FTE se generan mapas de escenarios sísmicos para diferentes periodos estructurales, para los terremotos: 1) del 17 de octubre de 1966 (Mw8.1), con hipocentro a 24 km de profundidad y a 236 km de la ciudad de Lima; y 2) del 26 de mayo de 2019 (Mw8.0), denominado sismo de Lagunas, ocurrido en Alto Amazonas, Loreto, Perú con hipocentro a una profundidad de 135 km y a 760 km de la ciudad de Lima.

## 3 OBJETIVOS

- Revisar los estudios preliminares de la respuesta del suelo que se han realizados en la zona y evaluar su alcance.

- Evaluar el comportamiento dinámico del suelo utilizando la técnica del cociente espectral (H/V) o también conocida como Nakamura con registros de ruido ambiental o microtemores (NHVSR, *Noise Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), y registros de sismos (EHVSR, *Earthquake Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) en el distrito de La Molina, Lima.
- Desarrollar mapas de isoperiodos, amplificación relativa e isopacas al depósito firme y su comparación con los desarrollados en la misma zona por otras dependencias.
- Desarrollar mapas de escenarios sísmicos para el terreno (PGA), y periodos estructurales de 0.2 y 0.4 segundos para el terremoto de subducción del 17 de octubre de 1966 (Mw8.1) y el terremoto intraplaca del 26 de mayo de 2019 (Mw8.0), denominado como sismo de Lagunas, ocurrido en Alto Amazonas, Loreto, Perú.
- Finalmente, se propone un **nuevo mapa de microzonificación sísmica** para el distrito de La Molina, cuyos límites de las cuatro zonas sísmicas propuestas, estarán compuestas por las curvas de igual periodo y las curvas de igual profundidad al estrato resistente. Así mismo, se caracterizarán cada zona con las aceleraciones de los escenarios sísmicos para PGA y periodos estructurales de 0.2 y 0.4 segundos para el terremoto de subducción del 17 de octubre de 1966 (Mw8.1) y el sismo intraplaca del 26 de mayo de 2019 (Mw8.0). Además, se buscará correlacionar las curvas de igual periodo con la distribución espacial del número de pisos que actualmente se ha construido en este distrito.

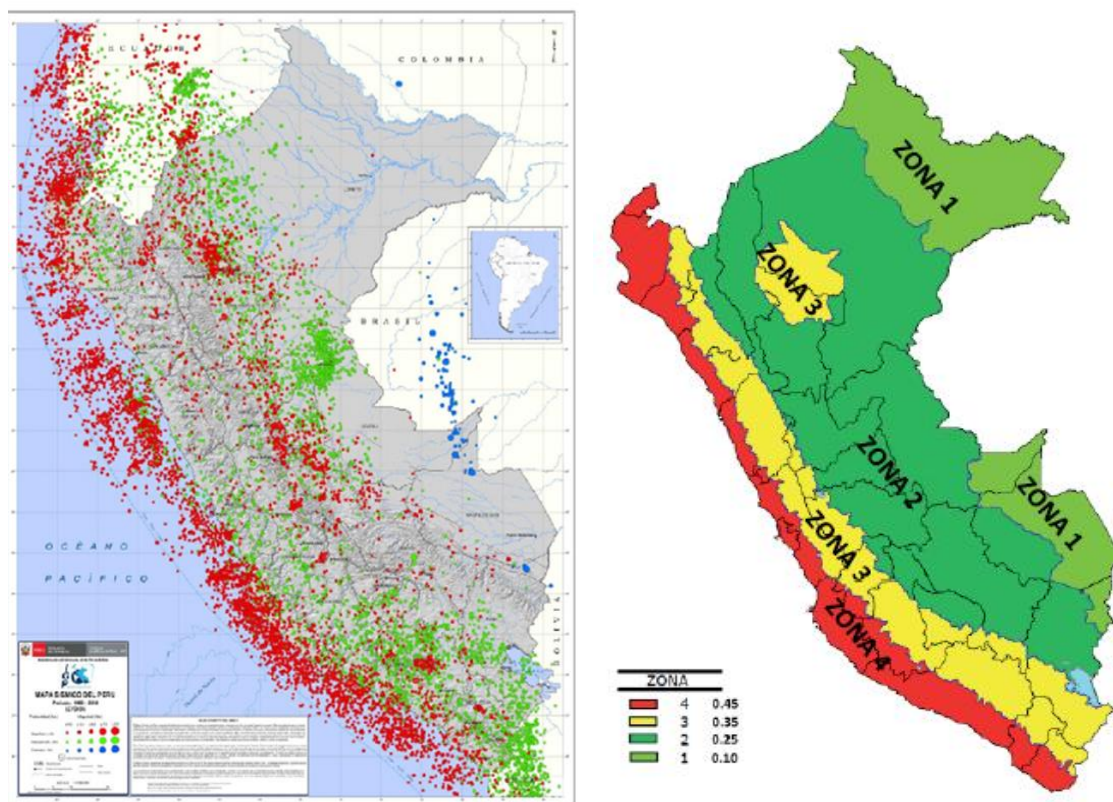
## 4 ALCANCES

Este estudio toma en cuenta trabajos pasados y los actualiza con los resultados de la campaña de monitoreo y registro de ruido ambiental y sismos realizada en el desarrollo del curso de capacitación. Los mapas de microzonificación sísmica, elaborados con fines académicos, pueden ser considerados como un aporte para la actualización de las Normas de Diseño Sísmico vigentes.

## 5 ANTECEDENTES

### 5.1 Regionalización y zonificación sísmica del Perú

La responsabilidad de la actual geodinámica y geomorfología de todo el territorio peruano es el proceso de convergencia entre las placas de Nazca (oceánica) y la Sudamericana (continental) con velocidades promedio del orden de 7-8 centímetros por año (DeMets et al, 2010; Norabuena et al, 1999). Este proceso genera sismos de diversas magnitudes y focos ubicados a diferentes profundidades, siendo los mayores quienes producen, en áreas urbanas, diversos niveles de daño estructural y pérdida de vidas humanas. En general, se puede afirmar que toda la población peruana ha sido testigo en el tiempo de la ocurrencia continua de estos sismos (figura 1).



**Figura 1.** Parte izquierda, Mapa sísmico del Perú para el período 1960 – 2011. Parte derecha, zonificación sísmica del Perú.

En la parte izquierda de la figura 5.1., se muestra esta distribución de la sismicidad, para el periodo entre 1960 a 2015, que han sido clasificados en función de la profundidad de sus focos en superficiales (círculos rojos, profundidad 0-60 km), intermedios (círculos verdes, profundidad 61-300 km) y profundos (círculos azules, profundidad entre 301-750 km); su magnitud  $M_w$  entre 4 a 8. Mientras que, en la parte derecha se muestra la zonificación sísmica del Perú, donde el Perú se ha dividido en cuatro zonas sísmicas, que presentan el factor Z, la cual se interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años.

## 5.2 Microzonificación del distrito de La Molina

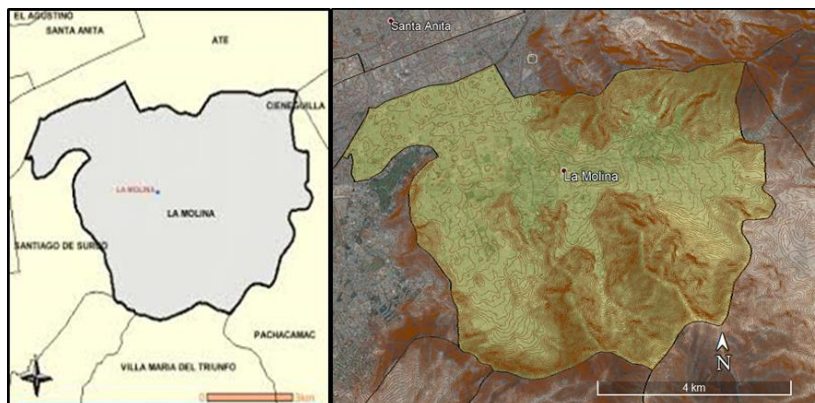
La extensión del distrito queda definida, aproximadamente, por las siguientes coordenadas geográficas:

$$\begin{aligned} &12^{\circ} 00' 03'' \text{ a } 12^{\circ} 00' 07'' \text{ Latitud Sur} \\ &76^{\circ} 57' 00'' \text{ a } 76^{\circ} 51' 00'' \text{ Longitud Oeste} \end{aligned}$$

El distrito de La Molina se ubica, geográficamente, en un área límite, entre lo que constituye la parte alta de la región Chala y la parte baja de la región Yunga, es decir entre Chala Hanan y Yunga Hurin, de acuerdo a la clasificación de Pulgar Vidal; nos estamos refiriendo a una altitud que va de 350 a 900 m.s.n.m. Al encontrarse La Molina en un área límite geográficamente, aunque con características particulares, nos permite observar en términos generales dos áreas claramente identificables. La que corresponde a la Chala Hanan está compuesta de tierras aluviales. Son terrenos aptos para la agricultura y es el lugar que los

pobladores prehispánicos irrigaron y dominaron. Es donde se asentaron haciendas y fundos agrícolas en las épocas coloniales y republicanas actualmente ocupados por la urbe. La correspondiente a la Yunga Hurin está compuesta de terrenos pétreos, arenales y desérticos, no aptos para la agricultura, por la falta de agua, y ocupados actualmente por viviendas, residencias y canteras de piedra y arena. También forman parte de esta área los rocallosos cerros que en muchas partes del distrito emergen.

Limita al norte con el distrito de Ate (Mayorazgo y Salamanca), al este con Pachacamac (de Manchay) y Cieneguilla al sur con Villa María del Triunfo y San Juan de Miraflores y al oeste con el distrito de Santiago de Surco. (Ver figura 2).



**Figura 2.** Ubicación y localización del distrito de la Molina.

El distrito de La Molina tiene seis grandes sectores claramente identificados:

- **Camacho:** Es una zona ubicada al oeste del distrito, en la cual se ubican viviendas unifamiliares de uno o dos pisos. Está conformado por las urbanizaciones de Camacho, que alberga algunos centros comerciales, Santa Sofía Magdalena, la urbanización La Fontana, parte de Cerros de Camacho (compartido con Surco) y la Residencial Monterrico. Esta zona limita con el distrito de Surco (Monterrico) y con el distrito de Ate (Salamanca). Está cruzada por la Avenida Las Palmeras, la Avenida Javier Prado y la Avenida Los Frutales. Conforman un 15 % del distrito.
- **La Molina Vieja:** Es la zona sur del distrito. En La Molina Vieja se encuentran viviendas unifamiliares de uno o dos pisos ubicadas en las urbanizaciones La Molina Vieja, La Alameda de la Molina Vieja, Los Sirius y El Remanso, Corregidor, aquí también se encuentran la facultad de Derecho y Medicina de la Universidad San Martín de Porres, también se encuentran las urbanizaciones Isla del Sol, Las Viñas de La Molina, Portada del sol, La Capilla, El Valle de La Molina y Las Lomas de la Molina Vieja. Conforman un 20 % del distrito.
- **Santa Patricia:** Se encuentra al norte del distrito, limita con el distrito de Ate (Mayorazgo) y está habitado mayormente por sectores de clase media en alta densidad. Está conformada por el cuadrante entre la Avenida La Molina, la Avenida Melgarejo, La Avenida Separadora Industrial y la Avenida La Universidad, e incluye urbanizaciones como Covima y Santa Raquel. Es la zona más grande del distrito. En este se encuentran varios centros de estudios superiores, así como también colegios. Si bien es una zona residencial, desarrolla también el comercio en avenidas como Melgarejo, Los Constructores, Flora Tristán y Javier Prado, sobre todo en lo que respecta a restaurantes. Es la urbanización más pintoresca visualmente, puesto que se encuentran importantes



obras arquitectónicas, como la sede principal de la Iglesia Mormona (hecha toda de mármol blanco) y la sede principal del Banco de Crédito del Perú.

- **La Universidad Agraria La Molina:** se encuentra ubicada en el medio del distrito. Debido a esta universidad y a sus grandes áreas verdes, La Molina es considerada un distrito ecológico.
- **Rinconada Alta, Rinconada Baja, Rinconada del Lago, La Planicie, El Sol de La Molina, Huertos de La Molina y Club Campestre Las Lagunas:** En estas urbanizaciones, la densidad poblacional es baja. Este sector empieza en Molicentro y es cruzado por la Avenida La Molina y la Avenida Elías Aparicio. Conforman un 20 % del distrito. Dentro de la urbanización Club Campestre Las Lagunas se encuentran 2 lagunas artificiales llamadas Laguna Chica y Laguna Grande.
- **Musa:** Está ubicada al este del distrito y limita con el distrito de Pachacamac (Huertos de Manchay) y Cieneguilla. Es una zona de carácter popular y fue formada como una cooperativa de vivienda de los trabajadores de la Universidad Nacional Agraria La Molina, SIPA, Municipalidad de La Molina y La Arenera. Está ubicada en las últimas cuadras de la Avenida La Molina o Carretera hacia Cieneguilla. Se estima que conforma aproximadamente el 5 % del distrito.

### ***5.2.1. Microzonificación geotécnica del distrito de La Molina***

CISMID (2010), desarrollo la siguiente microzonificación geotécnica del distrito de La Molina. En función a los perfiles estratigráficos encontrados en las diferentes áreas del distrito de La Molina, se ha dividido el área de estudio en cuatro zonas (Figura 3), habiéndose evaluado la capacidad de carga en cada una de ellas, tal como se describe a continuación:

**Zona I (Figura 3, color verde):** Está conformada por las laderas de los cerros donde existen afloramientos rocosos o estratos gravosos de origen coluvial y pequeño espesor, los cuales presentan una buena capacidad portante. Esta zona constituye una delgada franja que circunda todo el distrito de La Molina. Se han excluido de esta zona las áreas de taludes identificadas como de peligro moderado o alto, sin embargo, como dicho estudio estuvo limitado a tres zonas específicas, podrían existir otras áreas de alto peligro que deba ser excluidas de la Zona I.

La capacidad de carga admisible para una cimentación corrida de 0.60 m de ancho cimentada a una profundidad de 0.80 m a 1.20 m varía de 2.0 kg/cm<sup>2</sup> a 4.0 kg/cm<sup>2</sup>. Se considera que la cimentación debe estar asentada sobre terreno natural conformado por una grava compacta o roca; es decir, se deberá atravesar el estrato de relleno superficial que es heterogéneo y se encuentra en estado suelto.

**Zona II (Figura 3, color amarillo):** Abarca la zona relativamente plana, que se extiende desde el pie de las laderas hacia la zona del valle, conformada predominantemente por suelos gravosos coluviales y estratos de arena mal graduada de moderado espesor. En esta zona se encuentran ubicadas gran parte de las urbanizaciones Portada del Sol, SITRAMUN, Cascajal, La Capilla, Las Lomas de La Molina Vieja, Rinconada del Lago, La Planicie, Musa, así como también parte de otras urbanizaciones que se encuentran circundando la zona central del valle.

En esta zona también se incluye al sector conformado por las Urbanizaciones Santa Patricia, La Fontana, Magdalena Sofia, Villa F: A.P “Fundo Vásquez”, Camino Real, Los Captus,

Mayorazgo entre otros, cuyo terreno de fundación está conformado por la grava aluvial del río Rímac, que en este sector conforma una transición con los depósitos de suelos arenosos y finos profundos localizados en la parte central del distrito.

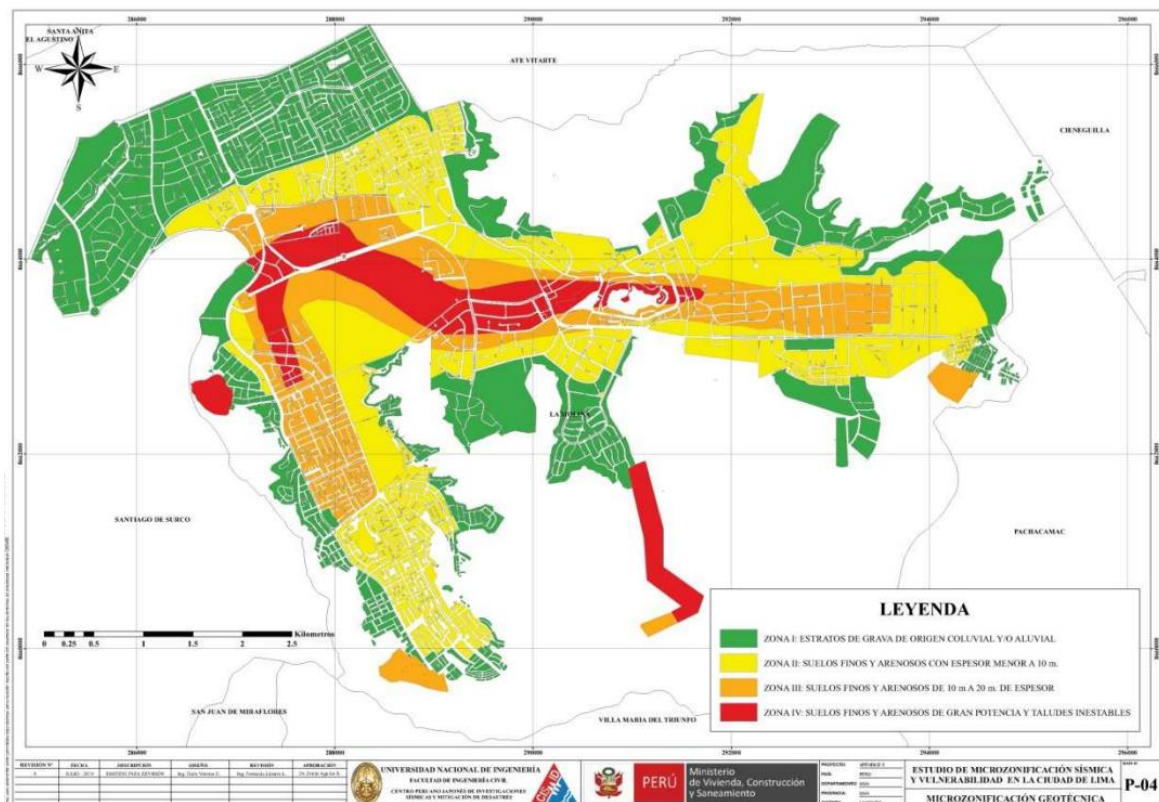
La capacidad de carga admisible para una cimentación corrida de 0.60 m de ancho varía de  $1.2 \text{ kg/cm}^2$  a  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  a la profundidad de cimentación de 1.00 m a 1.50 m. Se considera que la cimentación debe estar asentada sobre terreno natural conformado por un suelo arenoso denso o grava compacta.

**Zona III (Figura 3, color naranja):** Esta zona cubre la parte central del valle, conformado por suelos finos y arenosos potentes, abarcando principalmente el área comprendida entre las urbanizaciones El Remanso de la Molina y Las Viñas de La Molina, así como por toda el área de la urbanización El Sol de La Molina. En esta zona se encuentran también parte de las urbanizaciones La Estancia, El Haras, Los Portales, Rinconada Baja y Las Lagunas.

La capacidad de carga admisible para una cimentación corrida de 0.60 m varía de  $0.80 \text{ Kg/cm}^2$  a  $1.0 \text{ Kg/cm}^2$  a la profundidad de cimentación de 1.50 m a 2.00 m.

**Zona IV (Figura 3, color rojo):** Esta zona abarca la parte central y más profunda de valle, conformado mayormente por suelos finos y arenosos de gran potencia. Está conformada por la mayor parte de las urbanizaciones La Molina Vieja, La UNALM La Molina, El Haras y Las Lagunas. La capacidad portante del terreno en esta zona es baja, para una cimentación corrida de 0.60 m varía de  $0.60 \text{ Kg/cm}^2$  a  $0.8 \text{ Kg/cm}^2$ , especialmente en las áreas cubiertas por arenas finas de baja compacidad.

En esta zona se incluyen también las áreas de laderas clasificadas como de alto peligro por problemas de estabilidad de taludes.



**Figura 3.** Microzonificación geotécnica del distrito de La Molina (CISMID, 2010).

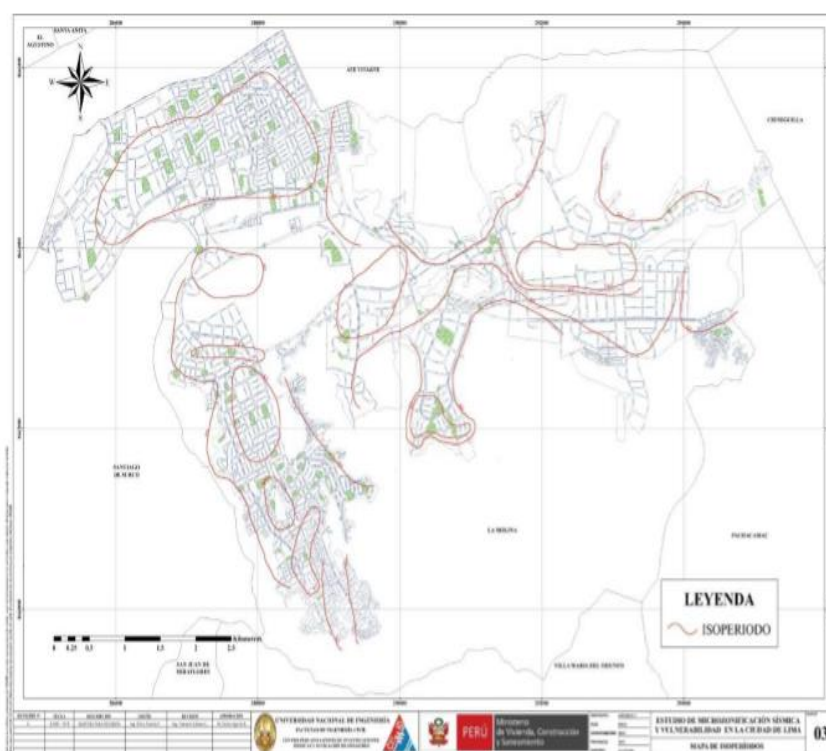
### 5.2.2. Microzonificación sísmica del distrito de La Molina

El mapa de microzonificación sísmica se elabora en función de la superposición de los resultados obtenidos del mapa de microzonificación geotécnica, el mapa de curvas de isoperiodos y los factores de amplificación determinados tanto en el estudio del CISMID (2002). En la figura 4, se muestra el mapa de curvas de isoperiodos con líneas de color café, cada 0.1 segundos.

Estos valores se correlacionan adecuadamente con los factores determinados en el estudio del CISMID (2002). Producto de esta superposición se ha subdividido al distrito de La Molina en cuatro zonas, las cuales se describen a continuación:

**Zona I (Figura 5, color verde):** Presenta la misma descripción y características mencionadas en la Zona I de la microzonificación geotécnica mostrada en la figura 3, en la cual se le agregó el comportamiento dinámico del terreno.

En esta zona el comportamiento dinámico es adecuado, por lo que se espera que no incremente el nivel de peligro sísmico, excepto en las áreas de fuerte pendiente y en las partes altas de los cerros, que pueden presentar amplificaciones por efectos topográficos. Los periodos dominantes del suelo se ubican alrededor de 0.10 s. Los factores de amplificación sísmica obtenidos para esta zona varían en un intervalo de 1.0 a 2.0.



**Figura 4.** Mapa de Isoperiodos (CISMID, 2010).

**Zona II (Figura 5, color amarillo):** Presenta la misma descripción y características mencionadas en la Zona II de la microzonificación geotécnica mostrada en la figura 3, en la cual se le agregó el comportamiento dinámico del terreno.

En esta zona se espera un moderado incremento del nivel de peligro sísmico por efecto del comportamiento dinámico del terreno. Los periodos dominantes del suelo varían de 0.10 s a 0.20 s. Los factores de amplificación sísmica obtenidos para esta zona varían en un intervalo de 2.0 a 4.0.

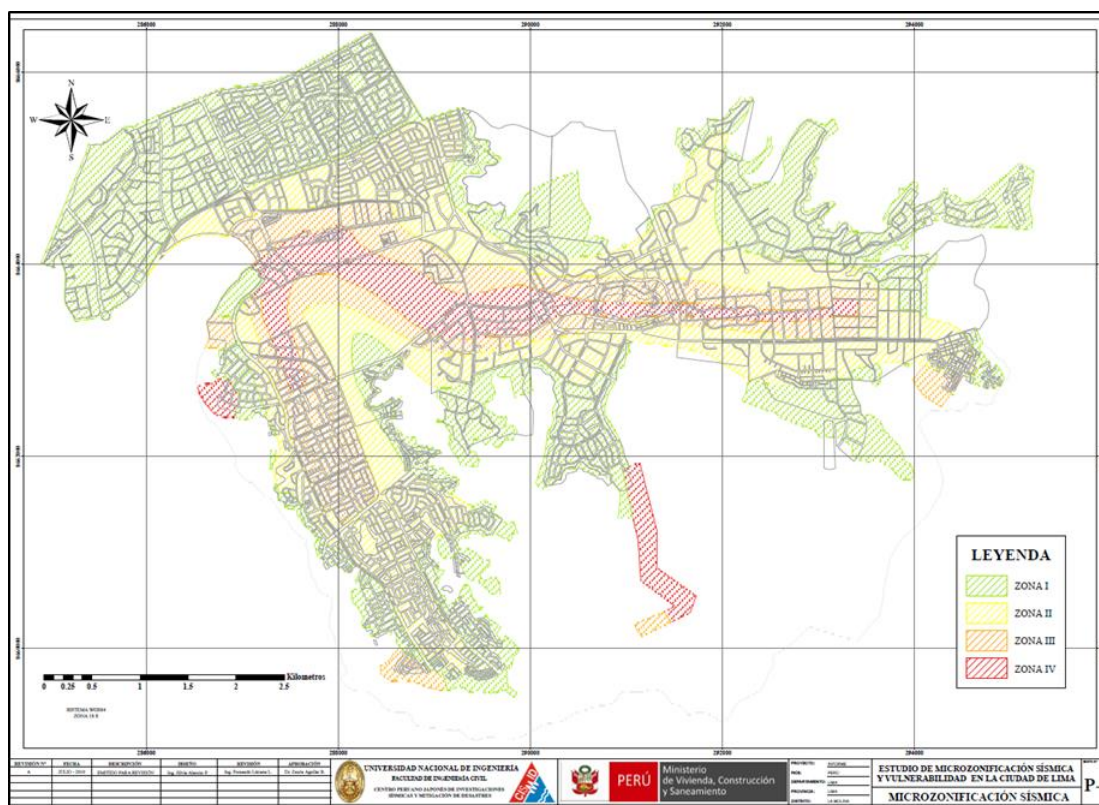
**Zona III (Figura 5, color naranja):** Presenta la misma descripción y características mencionadas en la Zona III de la microzonificación geotécnica mostrada en la figura 3, en la cual se le agregó el comportamiento dinámico del terreno.

Los periodos dominantes del suelo varían de 0.30s a 0.40 s. Los factores de amplificación sísmica obtenidos para esta zona se encuentran en un intervalo de 4 a 5.

**Zona IV (Figura 5, color rojo):** Presenta la misma descripción y características mencionadas en la Zona IV de la microzonificación geotécnica mostrada en la figura 3, en la cual se le agregó el comportamiento dinámico del terreno.

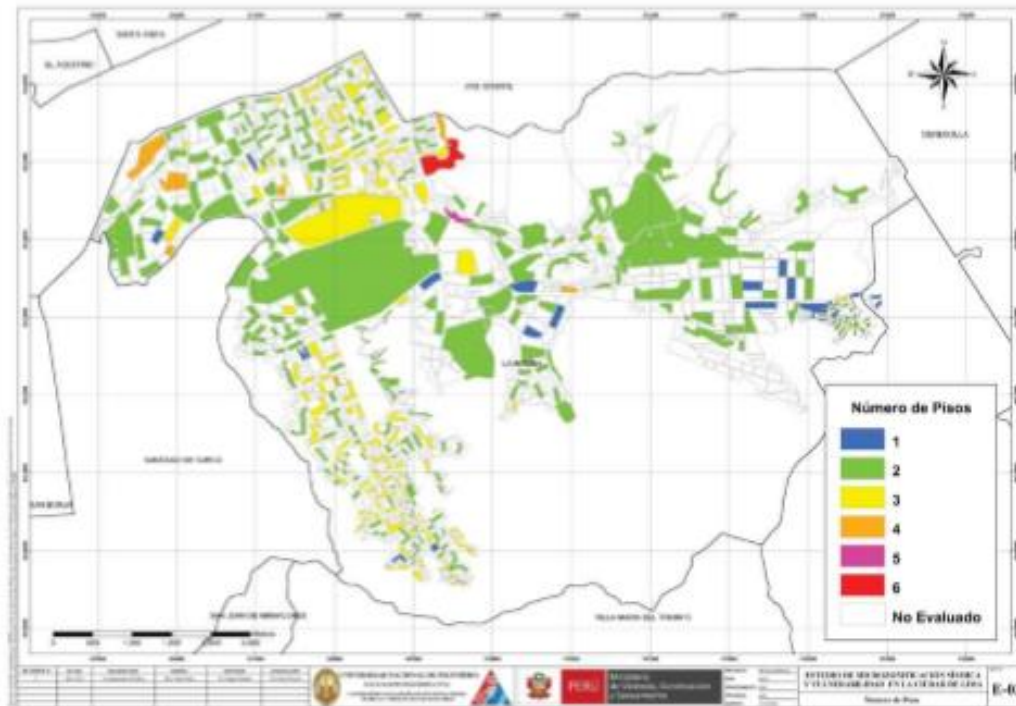
Los periodos dominantes del suelo toman valores iguales o mayores a 0.40 s. Los factores de amplificación obtenidos en esta zona son igual o mayores a 5.

Finalmente, CISMID (2011) gracias a un Programa de Apoyo a la Gestión Integral del Riesgo de Desastres Naturales a nivel urbano (ATDM/MD-11383), complementa el estudio de microzonificación sísmica en el distrito de La Molina, con la parte de vulnerabilidad sísmica. De ese estudio se ha tomado un mapa con la distribución espacial del número de pisos de cada una de las viviendas del distrito, como lo muestra la figura 6; con el objeto de utilizarlo en nuestro estudio.



**Figura 5.** Microzonificación sísmica del distrito de La Molina (CISMID, 2010).





*Figura 6 Mapa de Número de Pisos (CISMID, 2011).*

## 6 MARCO TEÓRICO

### 6.1 Conceptos sobre Dinámica de Suelos

Además de sus características mecánicas y geotécnicas, los suelos presentan propiedades dinámicas. Estas propiedades manifiestan el comportamiento del suelo ante la acción de ondas sísmicas modificando su amplitud, duración y contenido de frecuencias.

La rigidez y el amortiguamiento de los suelos constituyen las principales propiedades dinámicas. La rigidez está en función al módulo de corte ( $G$ ) y a la profundidad de la estratigrafía ( $H$ ). El módulo de corte representa la relación esfuerzo-deformación de corte del suelo. Asimismo, el amortiguamiento ( $\xi$ ) representa la capacidad del suelo de disipar energía, siendo su estimación mucho más compleja.

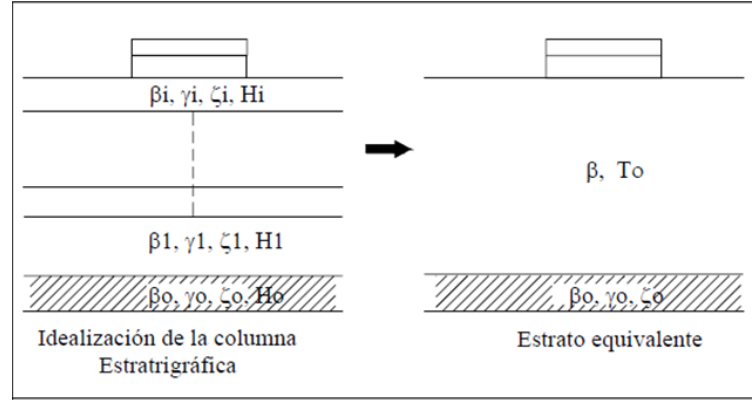
El valor de  $G$  decrece con la deformación del suelo y con su ingreso al rango no lineal. Por practicidad, se toma el valor máximo elástico ( $G_{max}$ ) (San Bartolomé, 1979). Este valor se relaciona con la velocidad de onda  $S$  ( $V_s$ ) y la densidad del material ( $\rho$ ) como lo indica la ecuación 6.1. En ese sentido, dado que la densidad según el tipo de roca o suelo no varía significativamente, la velocidad de onda de corte  $S$  es un parámetro que representa la rigidez del suelo.

$$G = \rho V_s^2 \quad (6.1)$$

Con base en la teoría unidimensional de propagación de ondas en medios estratificados, formulada por Haskell (1962), el suelo se comporta de manera lineal para cualquier nivel de excitación. Además, tomando en cuenta el principio geológico de superposición de estratos, se asume que el suelo se compone de estratos horizontales lateralmente infinitos. En ese

sentido, se descartan los efectos de irregularidad lateral. Estos estratos suprayacen sobre un semiespacio homogéneo que representa el sustrato o basamento rocoso (Limaymanta, 2009).

Según Montecillo (1996), la hipótesis de la incidencia vertical de las ondas S polarizadas horizontalmente permite simplificar el modelo estratigráfico real en un sólo estrato infinitamente lateral sin que pierda sus características principales: El periodo dominante y la velocidad de la onda de corte S (Figura 7).



**Figura 7.** Perfil estratigráfico real y Modelo estratigráfico simplificado (Limaymanta, 2009)

Según la Figura 7, el perfil estratigráfico representa el medio real y cada estrato está caracterizado por los parámetros de velocidad de ondas S ( $\beta_i$ ), la densidad del material ( $\gamma_i$ ), el amortiguamiento del estrato ( $\zeta_i$ ) y su espesor ( $H_i$ ). El semiespacio sobre el cual descansa el medio estratificado queda caracterizado también por los mismos parámetros ( $\beta_o, \gamma_o, \zeta_o$ ).

Tomando como referencia el perfil estratigráfico de la figura 7, el tiempo que tardan las ondas en atravesar el i-esimo estrato equivale a  $H_i/\beta_i$ . Por lo tanto, el tiempo total T que tardan en atravesar todos los estratos de suelo hasta llegar a la superficie es:

$$T = \sum \frac{H_i}{\beta_i} \quad (6.2)$$

Si la estratigrafía se representase por un estrato equivalente de espesor  $H = \sum H_i$ , la velocidad necesaria para que las ondas tarden el mismo tiempo en atravesarlo sería:

$$\beta = \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i}{\beta_i}} \quad (6.3)$$

La ecuación 6.3 es conocida como la velocidad media del depósito simplificado. Según Aki (1980), la solución de la ecuación de onda para incidencia vertical resuelve que el periodo predominante de vibración del medio ( $T_o$ ) está dado por:

$$T_o = \frac{4H}{\beta} \quad (6.4)$$

Si se combinan las ecuaciones (6.3) y (6.4) se obtiene:

$$T_o = \frac{4H}{\sum \frac{H_i}{\beta_i}} \quad (6.5)$$

Debido a que  $H = \sum H_i$ , se obtiene:

$$T_o = \frac{4 \sum \frac{H}{H_i / (\sum \frac{H_i}{\beta_i})}}{\sum \frac{H_i}{\beta_i}} = 4 \sum \frac{H_i}{\beta_i} \quad (6.6)$$

La ecuación 6.6 expresa que el estrato equivalente de la Figura 7 puede sustituir el medio estratificado idealizado de la misma figura. De esta manera,  $\beta$  y  $T_o$  dadas por las ecuaciones 6.3 y 6.6, respectivamente, se conservan.

Entonces, si  $T_o$  caracteriza el medio y depende directamente de las propiedades estratigráficas del mismo, la estimación de su valor puede permitir evaluar el efecto de sitio. Asimismo, se puede estimar la amplificación relativa de sitio ( $A_r$ ) asociada a  $T_o$ , otro parámetro asociado al efecto de sitio.  $A_r$  se define como la máxima amplificación que sufre el movimiento de las partículas de suelo blando con respecto al movimiento de las partículas en el semiespacio rocoso.

## 6.2 Método de Haskell-Thompson

Thompson (1950) y Haskell (1962) desarrollaron un método para estimar la respuesta sísmica del suelo mediante la propagación unidimensional (o convolución) de ondas elásticas. El suelo es definido por un modelo estratigráfico compuesto de capas elásticas, homogéneas y horizontales según se muestra en la imagen izquierda de la Figura 7.

Las propiedades elásticas que constituyen cada una de las capas del suelo ( $V_s$ ,  $\rho$ ,  $\xi$ ) son constantes y sus características dinámicas se definen mediante una función de respuesta de impulso unitario ( $h(t)$ ) o función de transferencia (FT) en el dominio de la frecuencia. Si la capa inferior de la columna estratigráfica se somete a la señal de entrada  $e(t)$ , la señal de salida  $s(t)$  resulta de la convolución de  $e(t)$  y  $h(t)$ . La señal se convoluciona a través de todos los estratos de suelo para obtener una señal o acelerograma sintético en la superficie.

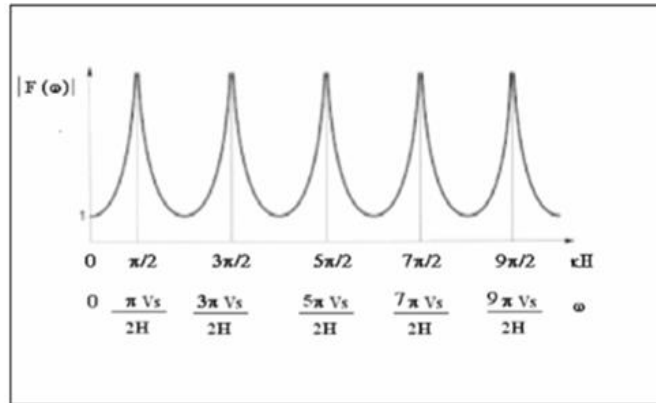
El procedimiento consiste en convolucionar una señal sísmica a través de las capas de suelo. Se estima que la señal de salida  $s(t)$  luego de las convoluciones se aproxime a la de un registro sísmico en superficie. Si ambas señales se ajustan adecuadamente, el modelo estratigráfico representa satisfactoriamente las características sísmicas del sitio.

## 6.3 Funciones de Transferencia

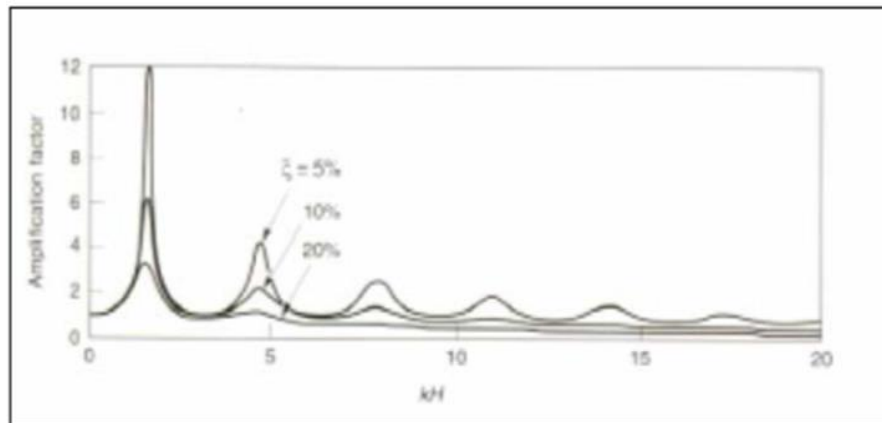
En ingeniería sísmica, la función de transferencia define el comportamiento dinámico del suelo en el dominio de las frecuencias y se obtiene mediante el cociente espectral de las ondas que llegan a la superficie y las que arriban a la interface suelo-basamento desde el hipocentro. Según el método empleado, pueden ser de dos tipos: Funciones de Transferencia Teórica (FTT) o Empírica (FTE). Las FTTs se obtienen de modelos estratigráficos teórico-analíticos como el método Haskell-Thompson y las FTEs, con métodos empíricos como la técnica del cociente espectral  $H/V$  o el método SSR.

### 6.3.1 Funciones de Transferencia Teórica (FTT)

La Figura 8 muestra la función de transferencia de un suelo modelado como un solo estrato elástico y homogéneo sin amortiguamiento. Como se observa, la FTT posee amplitudes infinitas en frecuencias iguales a  $\pi/2 + n\pi$ . Si se consideran distintos niveles de amortiguamiento, el suelo deja de tener amplitudes infinitas y se convierten en máximos para las mismas frecuencias (Figura 9).



**Figura 8.** Función de Transferencia de un suelo uniforme sobre sustrato rocoso sin amortiguamiento. (Fuente: Trigo, 2007)



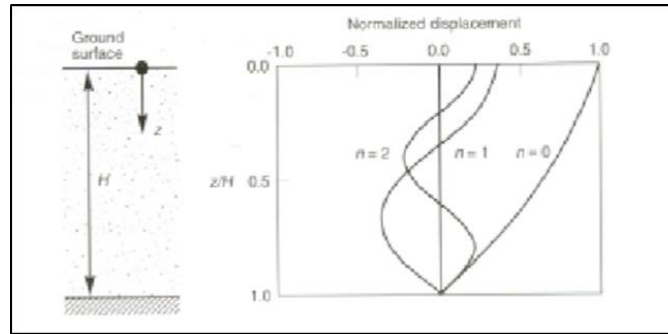
**Figura 9.** Función de transferencia de un suelo uniforme sobre sustrato rocoso para distintos niveles de amortiguamiento. (Fuente: Trigo, 2007).

Las frecuencias a las que se dan estos máximos locales se conocen como frecuencias naturales del suelo y dependen de la velocidad de onda S y del espesor de la capa de sedimentos H, según,

$$\omega_n = \frac{\pi}{2} \frac{V_s}{H} + n\pi \quad \text{con } n = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (6.7)$$

La figura 10 presenta los movimientos del suelo en sus distintos modos de vibración para las frecuencias de la ecuación 6.7.



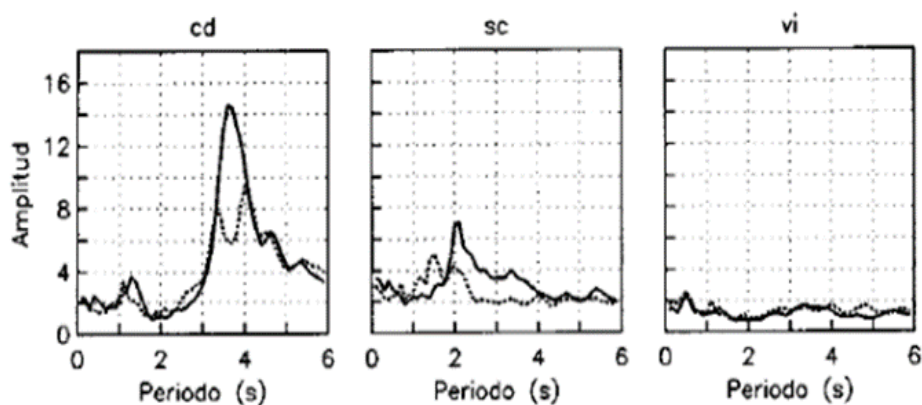


**Figura 10.** Movimiento del suelo para distintos modos de vibración ( $n=0$ ,  $n=1$ ,  $n=2$ ) (Fuente: Trigo, 2007)

En este caso especial, la frecuencia fundamental es la frecuencia más baja,  $\omega_o = \pi V_s/2H$ , cuya inversa corresponde con el periodo predominante del suelo (Ecuación 6.4). En ese sentido, el periodo fundamental del suelo proporciona el armónico predominante del movimiento.

### 6.3.2 Funciones de Transferencia Empírica (FTE)

Las FTEs se obtiene de métodos empíricos que utilizan registros sísmicos, el más conocido el método del Cociente Espectral Estándar o SSR (Borcherdt, 1970). Si existe un alto contraste de impedancias entre suelo-roca, el periodo fundamental del suelo se visualiza claramente en la gráfica espectral. Los suelos que no son homogéneos y que contienen tipologías variadas o más de un estrato superficial poseen funciones de transferencia menos definidas. Estas gráficas deben de interpretarse con más detenimiento y de manera integral. La figura 11 muestra las FTEs para tres puntos de registro en la ciudad de México con los sismos de 1985 y 1989 utilizando el método SSR. La diferencia entre gráficas se debe a que cada una se tomó en zonas con diferente tipo de suelo.



**Figura 11.** Funciones de Transferencia para tres sitios en la Ciudad de México con los sismos de 1985 (línea continua) y el de 1989. (Fuente: Lermo et al., 1994b)

Sin embargo, otra alternativa de métodos empíricos que utilizan registros sísmicos o ruido ambiental, se encuentra la técnica del Cociente Espectral H/V (Nakamura, 1989). Los últimos años después de su publicación se ha mejorado en la comprensión de esta técnica, como se

comenta a continuación. El uso de las FTE a partir de registros de sismos (EHVSR, *Earthquake Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) o microtemores (NHVSR, *Noise Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) para caracterizar los efectos de la geología de superficie, generalmente llamados efectos de sitio, se pueden describir mediante funciones de transferencia asociadas a diversas ondas entrantes con diversos ángulos de incidencia y polarizaciones. Sin embargo, las diversas funciones de transferencia a menudo son muy diferentes y esto explica en parte por qué la búsqueda de un factor simple para explicar los efectos del sitio ha sido hasta ahora inútil. Con el advenimiento de la teoría del campo difuso (ver Weaver 1982, 1985, Campillo y Paul 2003, Sánchez-Sesma et al., 2011a) se establece el gran poder de resolución de las densidades de energía promedio dentro de un campo sísmico difuso. La coda de los terremotos es el ejemplo paradigmático de un campo difuso producido por la dispersión múltiple (ver Hennino et al., 2001; Margerin et al 2009). En un sentido amplio, este es el caso del ruido sísmico (Shapiro y Campillo 2004) y de los conjuntos de terremotos (Kawase et al., 2011; Nagashima et al., 2014; Baena-Rivera, et al., 2016). Por lo tanto, de acuerdo con Kawase et al. (2011) el EHVSR en un medio estratificado proporcional a la relación de las funciones de transferencia. Por otro lado, Sánchez-Sesma et al. (2011b) mostraron que, al asumir un campo de onda difusa, el NHVSR puede modelarse en el dominio de la frecuencia en términos de la proporción de la parte imaginaria de los componentes de traza de la función de Green en la fuente. Este enfoque incluye naturalmente las contribuciones de Rayleigh, Love y las ondas corporales.

Finalmente, en ambientes sedimentarios, el NHVNR de microtemores, el EHVSR de eventos sísmicos y las predicciones teóricas están en acuerdo razonable (Lermo y Chávez-García, 1994b).

### 6.3.3 Amplificación Sísmica

La amplificación del movimiento sísmico es causada de dos formas: Amplificación geométrica y dinámica.

La amplificación geométrica es causada por el contraste de impedancias que existe entre dos medios en contacto. Para la capa sedimentaria que suprayace sobre el sustrato rocoso, el contraste de impedancias se expresa de la siguiente manera:

$$I_C = \frac{\rho_B \cdot V_B}{\rho_S \cdot V_S} \quad \text{con } V_B > V_S \quad \dots(6.8)$$

Donde B representa al sustrato rocoso (Bedrock), S la capa de sedimentos. V, la velocidad de onda S y  $\rho$ , la densidad. Para capas sedimentarias con materiales más jóvenes y menos consolidados, el contraste de impedancias es mayor y, por lo tanto, mayor es la amplificación geométrica. Debido a que el material sedimentario tiene baja impedancia, las ondas sísmicas quedan atrapadas provocando la amplificación en la frecuencia predominante del suelo.

La amplificación dinámica está asociada al efecto de resonancia y relacionada a la cercanía entre la frecuencia de las ondas sísmicas que arriban al sustrato rocoso y la frecuencia fundamental del depósito sedimentario. Si la frecuencia de la señal sísmica se asemeja a la frecuencia fundamental del suelo, la amplificación se incrementa significativamente.

## 7 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE SITIO PARA LA MICROZONIFICACIÓN

### 7.1. Levantamiento de datos de campo

El levantamiento de datos de campo se llevó a cabo el martes 6 de agosto del 2019. El trabajo consistió en el registro de microtemores en 38 puntos de medición con dos equipos marca Güralp 6TD de banda ancha (0.03 – 100 Hz, figura 12). Las mediciones fueron realizadas por dos cuadrillas bajo la supervisión del Mtro. Javier Lermo y el Mg. Julio Ríos (Figura 13).

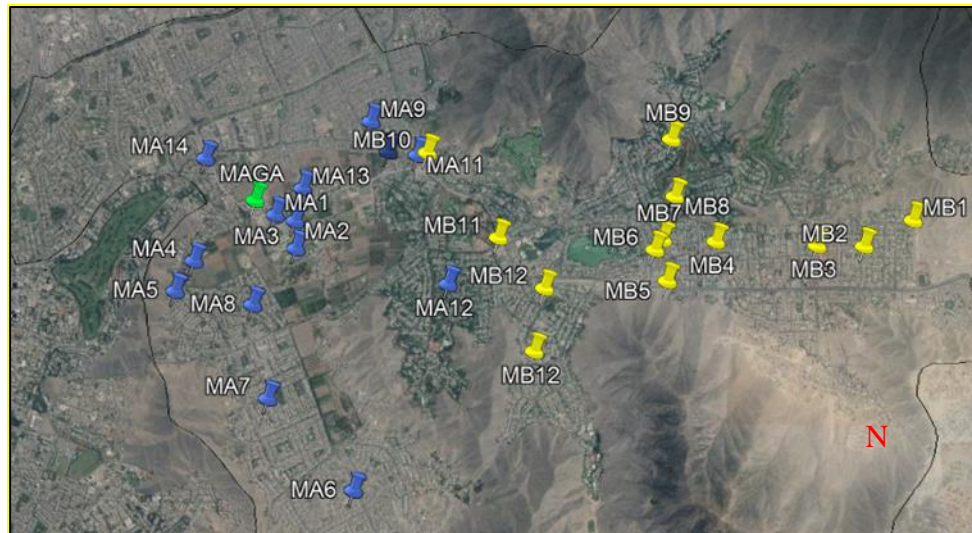


*Figura 12. Sismógrafo Güralp 6TD*

El primer grupo realizó registros por las zonas de La Molina Vieja, La Universidad Agraria, Camacho y Santa Patricia. El segundo grupo cubrió las zonas de la Rinconada, El Sol de La Molina y Musa. En la figura 14 se observa un mapa con los puntos cubiertos por las dos cuadrillas. Además, se debe indicar que las mediciones fueron hechas en la mañana y en la tarde (como se describe en la tabla 7.1), por lo que es posible una cierta influencia de las fuentes directas en las lecturas de los datos. El tiempo de medición ha sido en promedio de 20 minutos por cada punto. En el anexo se detallan la toma de datos de los 28 puntos.



*Figura 13. Equipo de trabajo dividido en dos cuadrillas para cubrir el trabajo de campo en el distrito de La Molina.*



**Figura 14.** Mapa que muestra la distribución espacial de los 28 puntos registrados por las dos cuadrillas (Primer grupo: Puntos azules. Segundo grupo: Puntos amarillos). En verde el punto MAGA registrado por todo el equipo al inicio del trabajo de campo en la puerta de la Universidad Agraria La Molina.

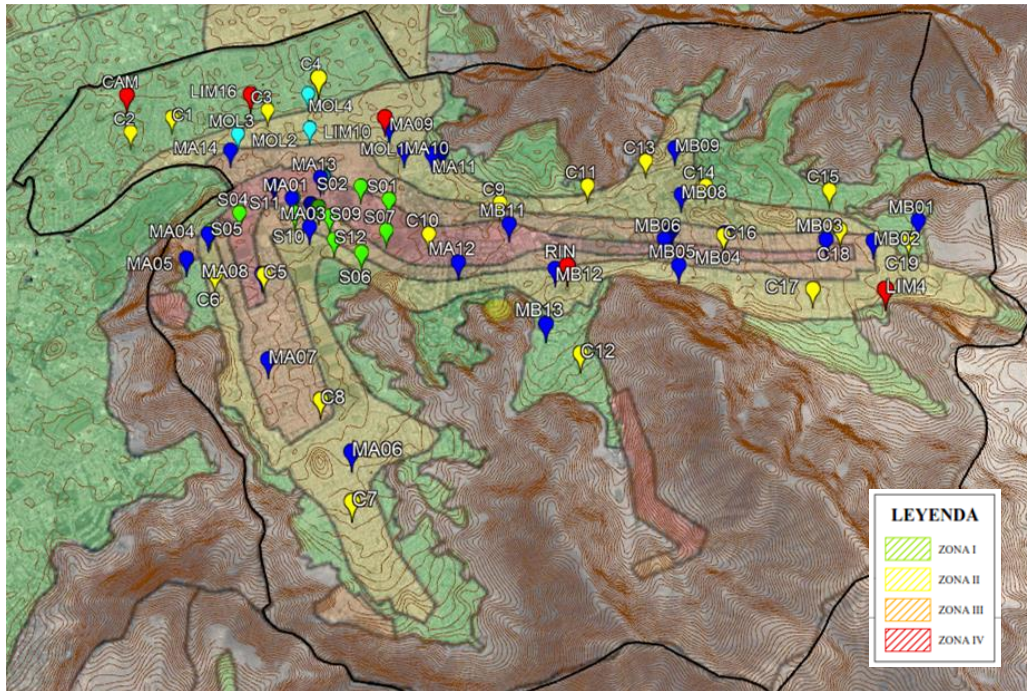
**Tabla 7-1.** Descripción de los puntos y horas estimadas de las mediciones

ITEM	PUNTOS	HORA LOCAL	NOMBRE DE EQUIPO	COORDENADAS WGS 84-Z 18		DESCRIPCIÓN
				Este(m)	Norte (m)	
1	MAGA	09:00 a. m.	T6N77-M009	287586	8663898	Puerta UNALM
2	MA-1	09:30 a. m.	T6R03-M004	287787	8663749	UNALM (Centro de cultivos)
3	MA-2	09:57 a. m.	T6R03-M004	287984	8663691	Frente a la escuela de Pos grado UNALM
4	MA-3	10:29 a. m.	T6R03-M004	287997	8663419	Estacionamiento UNALM
5	MA-4	11:15 a. m.	T6R03-M004	286987	8663290	Parque Infantil "Barbara D' Achille"
6	MA-5	11:54 a. m.	T6R03-M004	286813	8662990	Calle los Crisantemos
7	MA-6	12:32 p. m.	T6R03-M004	288608	8661054	Plaza Biblioteca La Molina Sur
8	MA-7	01:05 p. m.	T6R03-M004	287742	8661943	Facultad de Medicina U.S.M. P
9	MA-8	01:36 p. m.	T6R03-M004	287579	8662862	Calle Las Begonias
10	MA-9	02:48 p. m.	T6R03-M004	288724	8664678	Óvalo del Parque Cáceres
11	MA-10	03:20 p. m.	T6R03-M004	288900	8664383	Altura de Av. Flora Tristán
12	MA-11	03:50 p. m.	T6R03-M004	289190	8664348	Altura del mall- Grifo Petro Perú
13	MA-12	04:30 p. m.	T6R03-M004	289511	8663078	Altura Av. Manuel Prado Ugarteche
14	MA-13	04:52 p. m.	T6R03-M004	288055	8664012	Puerta N° 1 UNALM-(BCP)
15	MA-14	05:30 p. m.	T6R03-M004	287084	8664305	Av. Manzanos
16	MB-1	10:00 a. m.	T6N77-M009	294078	8663722	Calle Acapulco
17	MB-2	10:24 a. m.	T6N77-M009	293602	8663467	Calle Bahamas/ Naplo
18	MB-3	10:53 a. m.	T6N77-M009	293143	8663473	Jr. Paracas/ La molina sport
19	MB-4	11:34 a. m.	T6N77-M009	292151	8663510	Calle lido 285
20	MB-5	12:01 p. m.	T6N77-M009	291675	8663119	Paradero paraíso
21	MB-6	12:27 p. m.	T6N77-M009	291553	8663428	Jr. Chalana/Sotavento 488
22	MB-7	12:57 p. m.	T6N77-M009	291629	8663528	Calle timonel
23	MB-8	01:29 p. m.	T6N77-M009	291745	8663950	José León Barandiarán 790 (Cerca est. RIN)
24	MB-9	01:59 p. m.	T6N77-M009	291709	8664514	José León Barandiarán 176
25	MB-10	03:40 p. m.	T6N77-M009	289292	8664375	Av. Melgarejo/Av. La molina grifo Primax
26	MB-11	04:23 p. m.	T6N77-M009	290006	8663539	Tottus
27	MB-12	05:00 p. m.	T6N77-M009	290467	8663044	Av. Rinconada del lago (Caseta de serenazgo)
28	MB-13	05:33 p. m.	T6N77-M009	290373	8662424	Av. Rinconada del lago 682









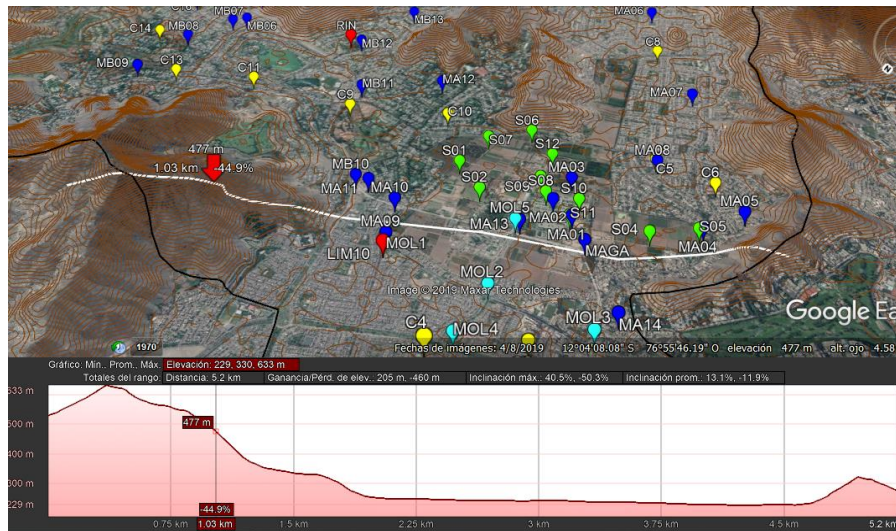
**Figura 16.** Mapa de la zona de estudio con curvas de nivel y la microzonificación vigente del CISMID, que muestra la distribución espacial de los 68 puntos analizados.

Se generaron perfiles transversales a lo largo del distrito de La Molina para conocer mejor la topografía y geomorfología de la zona de estudio. La figura 17 muestra la ubicación de los 6 perfiles elegidos, los cuales se han trazado con líneas blancas. A continuación, las figuras siguientes (Figura 18 a 23), muestran las secciones transversales de cada perfil, así como los puntos evaluados cercanos y las zonas involucradas con más detalle.

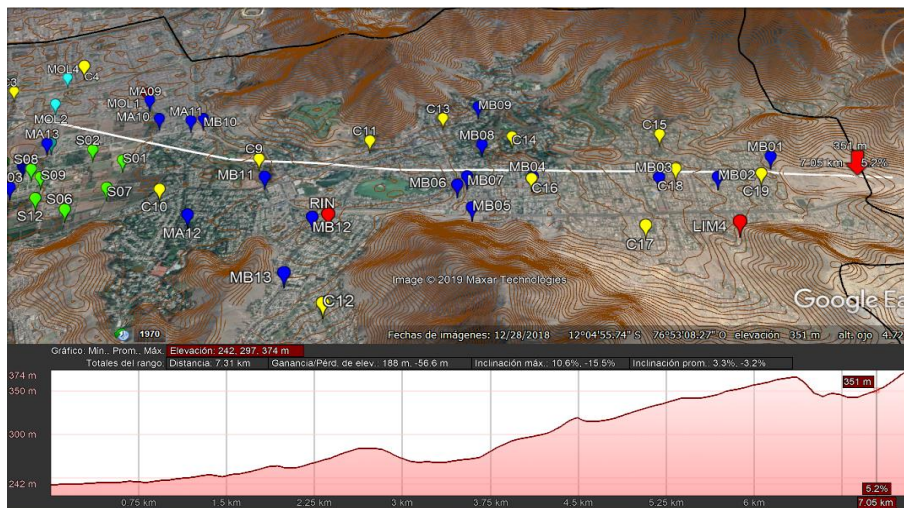


**Figura 17.** Perfiles en el distrito de La Molina. Líneas de color blanco

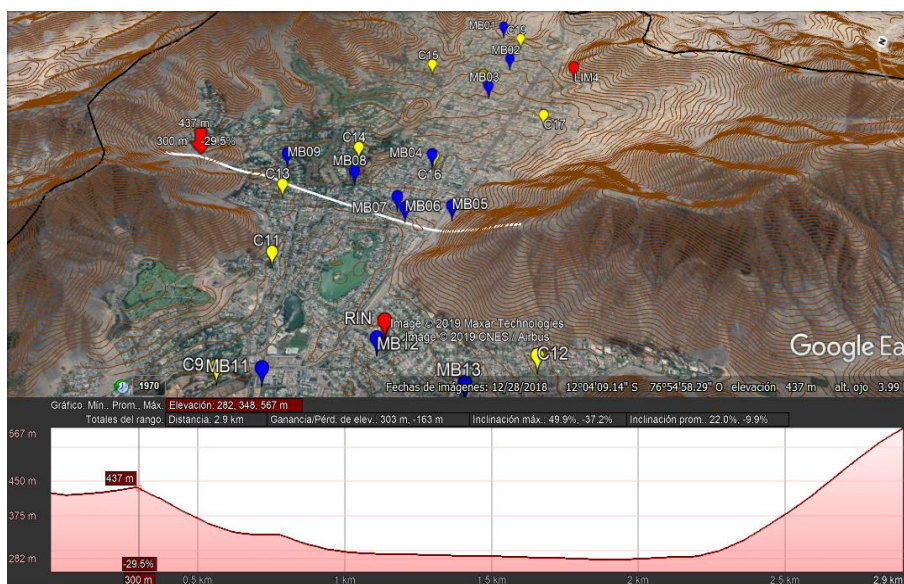




**Figura 18.** Perfil 1 ubicado en la zona oeste de La Molina.

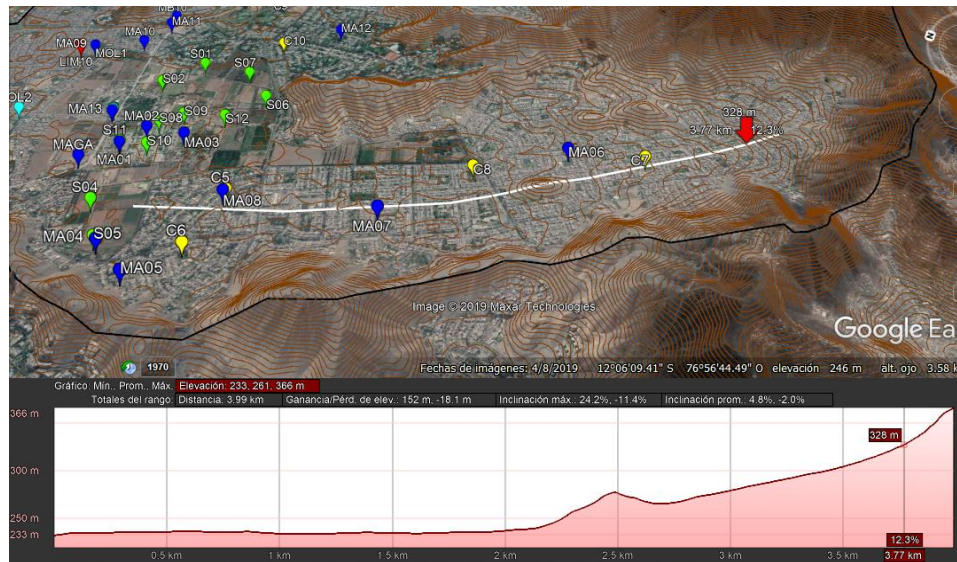


**Figura 19.** Perfil longitudinal 2 ubicado en la zona este de La Molina.

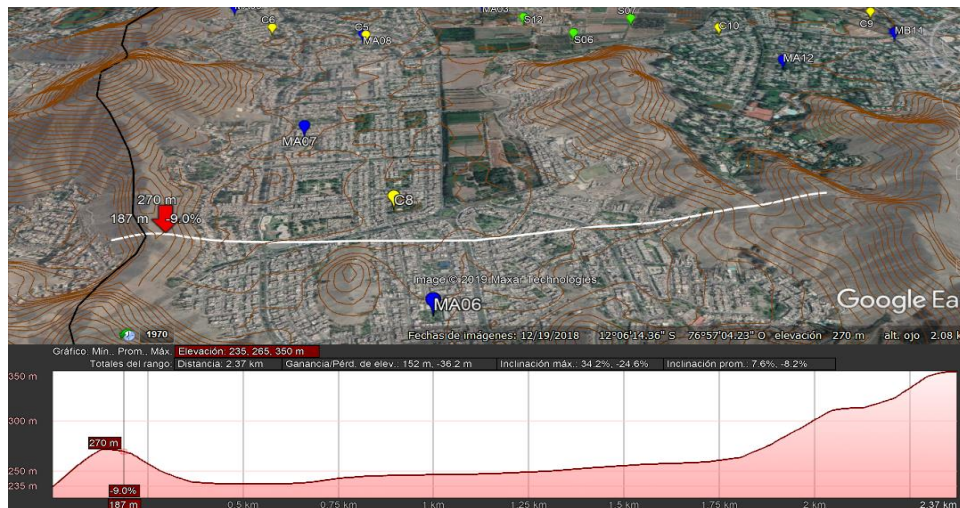


**Figura 20.** Perfil transversal 3 ubicado en la zona este de La Molina.

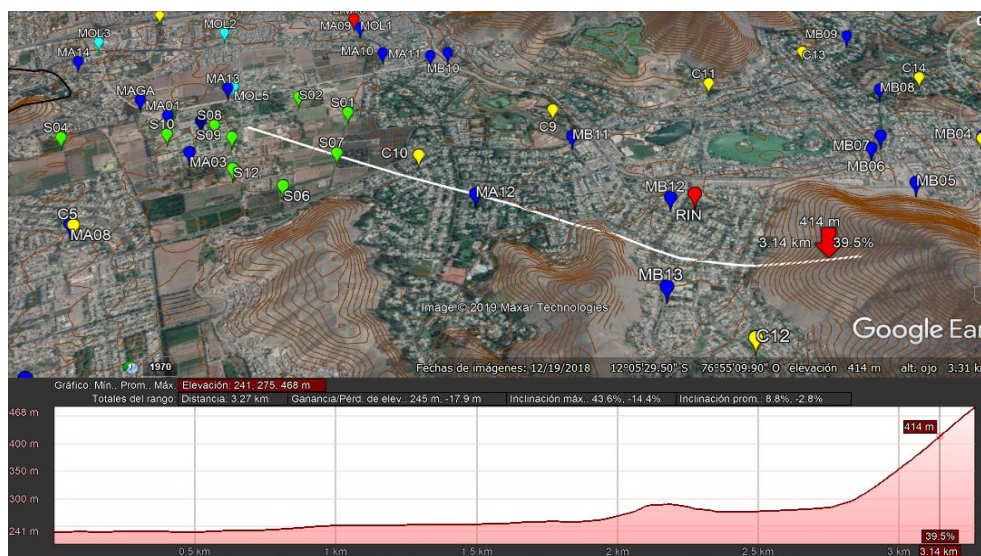




**Figura 21.** Perfil longitudinal 4 ubicado en la zona sur de La Molina.



**Figura 22.** Perfil transversal 5 ubicado en la zona sur de La Molina.



**Figura 23.** Perfil 6 ubicado en la zona central de La Molina.

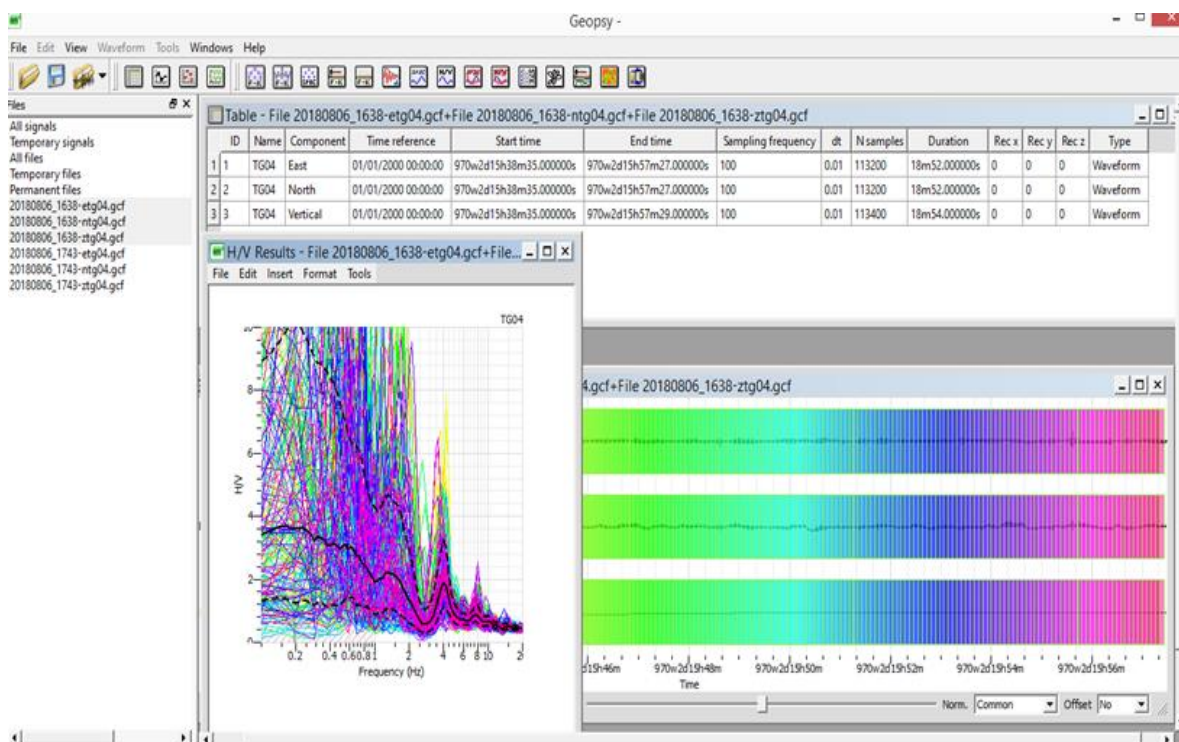


## 7.2 Procesamiento de datos

El uso de microtemores (vibración ambiental) para obtener la estimación de la respuesta de sitio fue introducido en Japón por los años 50 (Kanai et al., 1954). A pesar de los cuestionamientos que se han hecho sobre su utilidad (Finn, 1991; Gutiérrez y Singh, 1992; Lachet y Bard, 1994), las mediciones de microtemores son altamente atractivos para la caracterización de la respuesta de sitio, por su sencillez de operación y su bajo costo, así como por la rapidez con que permiten obtener resultados.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, una de las técnicas, introducidas recientemente, para estimar efectos de sitio usando registros de microtemores es la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro (técnica de Nakamura o NHVSR, *Noise Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), propuesta originalmente por Nakamura (1989). Lermo y Chávez-García (1994 a,b) compararon resultados de microtemores con la razón espectral estándar de registros sísmicos en México. Ellos concluyeron que los microtemores, cuando son analizados con NHVSR, permiten la determinación, con buena precisión, del periodo dominante ( $T_0$ ) de sedimentos sujetos a amplificación dinámica en un intervalo de frecuencias entre 0.2 y 10 Hz, junto con una estimación preliminar del nivel de amplificación ( $A_r$ ).

Después del registro de datos se realizó el procesamiento de los mismos. Para cada punto registrado se obtuvieron tres registros para cada coordenada N, E y Z (Figura 24) y se cargaron en el software Geopsy V2.9.0. Este software que aplica la técnica NHVSR posee una interfaz gráfica para organizar, ver y procesar señales geofísicas (Bard, 1999). En la tabla 7.2 se apuntan los parámetros de procesamiento para los puntos registrados.

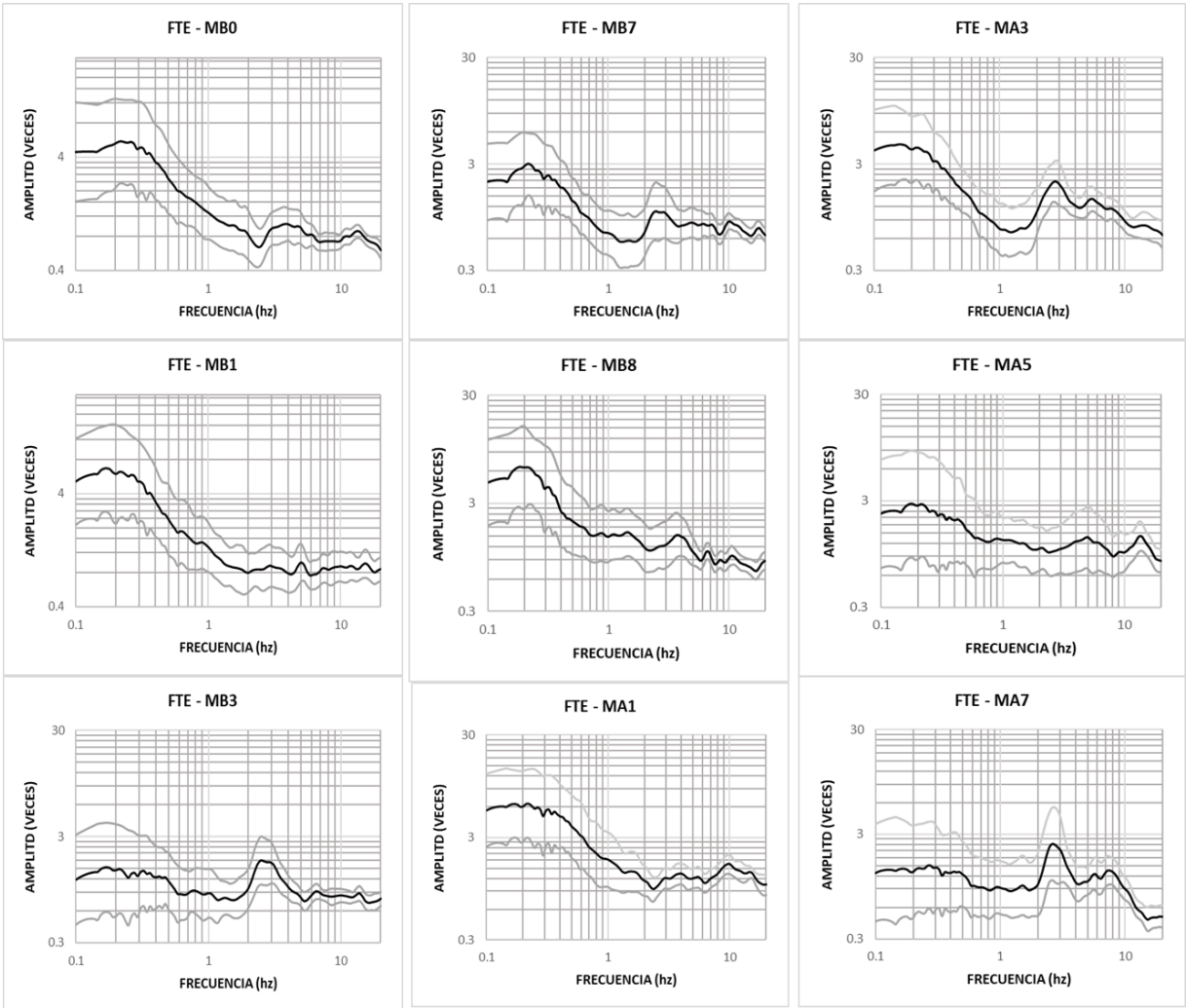


**Figura 24.** Análisis por ventanas y promedios de las funciones de transferencia empíricas

**Tabla 7-2:** Parámetros de procesamiento utilizados en Geopsy para los registros de microtemores.

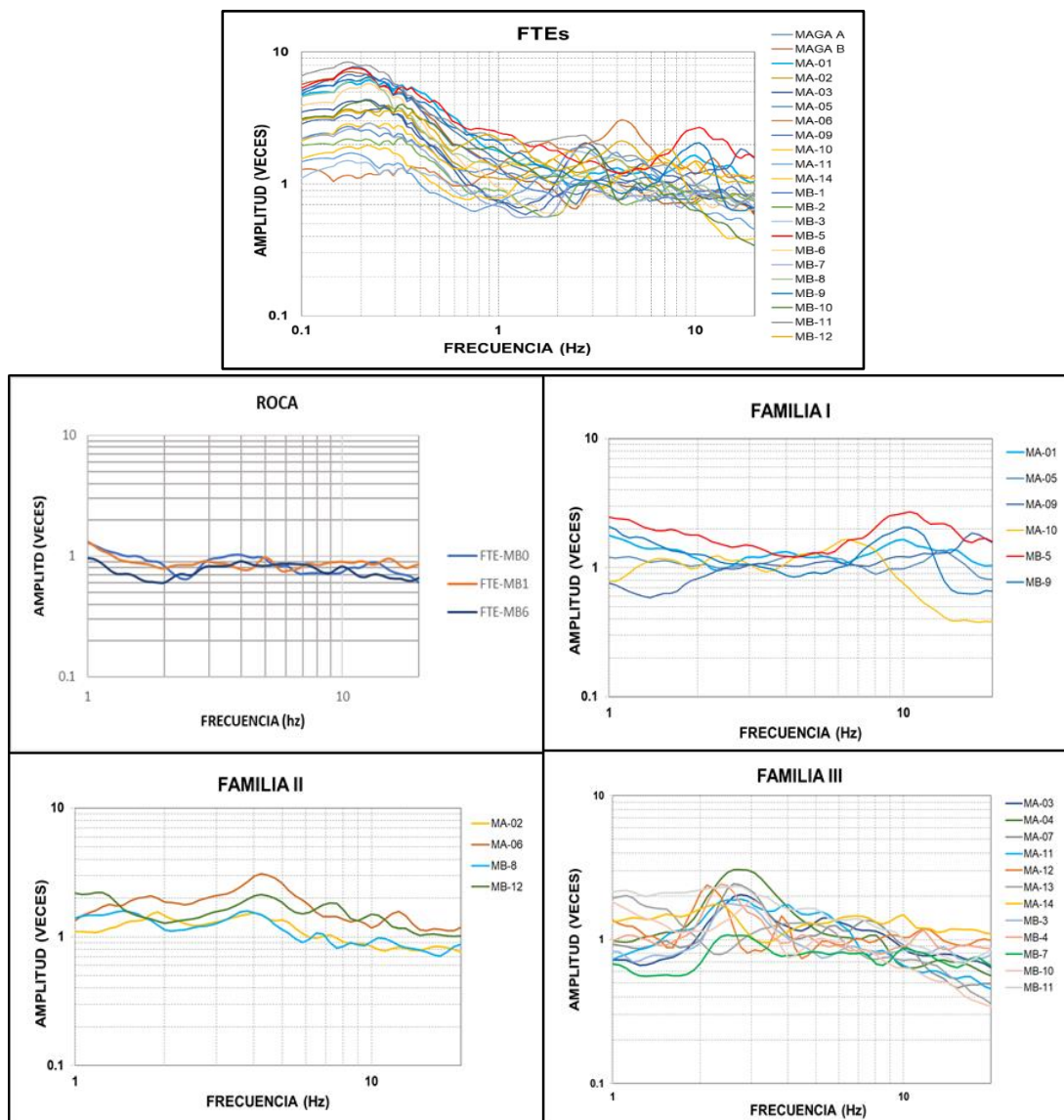
Parámetros ingresados al Geopsy	
Longitud de ventanas	20.48 seg
Overlap entre ventanas	50%
Suavizado	Konno & Ohmachi 40
Ancho del taper	
coseno	5%
Frecuencias de análisis	1 a 10 Hz

En la figura 25 se presentan los resultados obtenidos al aplicar la técnica de Nakamura para 9 sitios a manera de ejemplo. Se presenta una gráfica H/V (NHVSR) para cada punto, considerando un promedio cuadrático entre las componentes horizontales. En las gráficas, la línea continua gruesa (línea negra) indica el resultado promedio obtenido en cada sitio. Las líneas delgadas muestran la desviación estándar positiva y negativa que resultan del cálculo entre las ventanas generadas a lo largo de los 20 minutos de registro en cada lugar.



**Figura 25.** Funciones de transferencia empíricas (FTE) obtenidas para 9 puntos ubicados en el distrito de La Molina

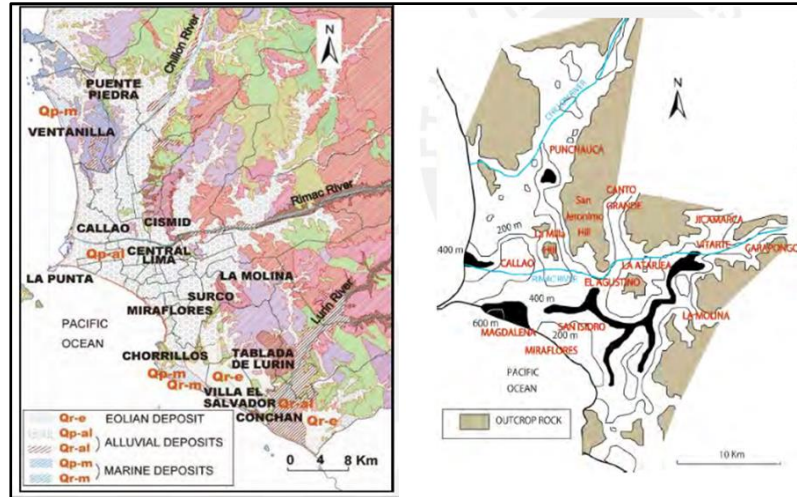
En la parte superior de la figura 26 se ha graficado las FTEs de los 28 puntos analizados dentro del distrito de La Molina, como se puede observar estas FTEs presentan varios máximos espectrales, tanto hacia bajas frecuencias como en altas. Por lo que se obtienen se agrupan según su forma espectral, utilizándose el concepto de las familias espectrales. Lo más resaltante de cada familia es que muestran las similitudes del comportamiento dinámico del suelo en una misma banda de frecuencias entre los distintos puntos evaluados.



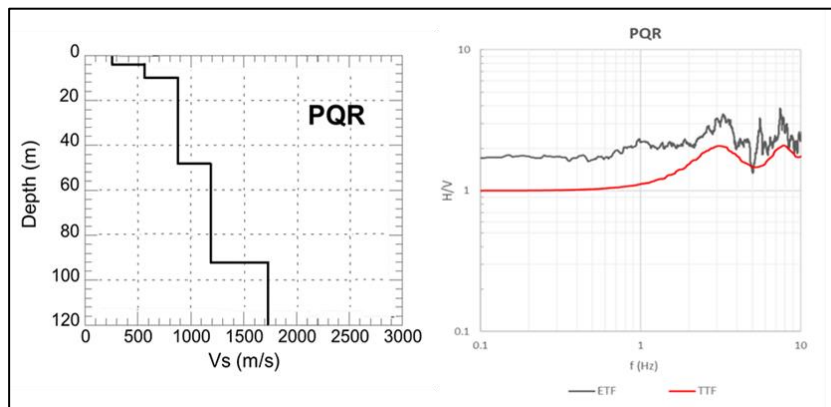
**Figura 26.** Funciones de transferencia empíricas (FTE) agrupadas en familias espectrales para el distrito de La Molina.

En general, la mayoría de las FTE presentan también máximos hacia bajas frecuencias ( $< 2.0$  Hz o  $> 0.5$  seg), el cual puede interpretarse como la respuesta del depósito aluvial (conglomerado) que presenta un espesor entre los 100 y 200 metros en el distrito de la Molina como lo muestra Le Roux et. al. (2000) en la parte derecha de la Figura 27. Si observamos el mapa geológico de la ciudad de Lima desarrollado por INGEMMET 1992 (parte izquierda, figura 27), vemos que este depósito se presenta en toda la ciudad de Lima y el distrito de La Molina no es una excepción. Asimismo, una estimación de su espesor lo realizó Diana Calderón (2011), al construir una estratigráfica utilizando arreglos de sismógrafos de banda

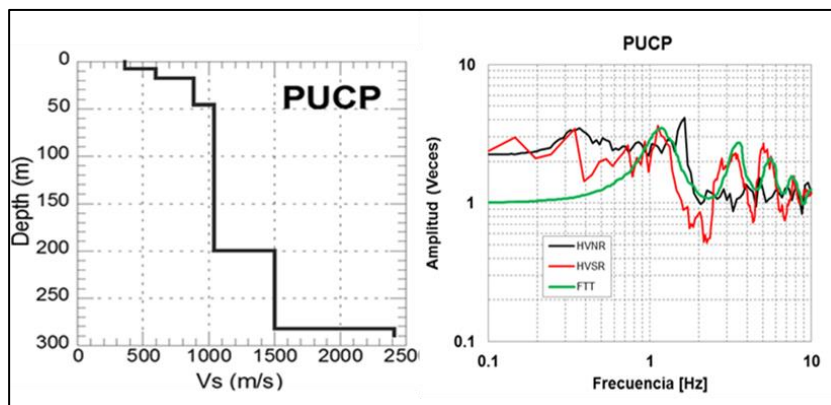
ancha, y registrar ruido para obtener curvas de dispersión y con ello su estimación en la estación sísmica (PQR), como se puede observar en la figura 28. Adicionalmente, este depósito aluvial es visible también en la PUCP presentándose con un pico alrededor de 1 Hz, evaluado por Ríos (2016), como se muestra en la figura 29 y documentado también por Quispe et al (2014).



**Figure 27.** Parte izquierda, mapa Geológico de la ciudad de Lima. Parte derecha, profundidad del basamento rocoso en la ciudad de Lima.



**Figure 28.** (A) Perfil de onda Vs en la estación PQR (Calderon et al, 2012) (B) Comparación entre Función de Transferencia Teórica y Empírica en la estación PQR (Ríos, 2018).



**Figure 29.** (A) Perfil de onda Vs en la estación PUCP (Quispe et al, 2014) (B) Comparación entre Función de Transferencia Teórica y Empíricas con ruido y sismo en la estación PUCP (Ríos, 2016).



Regresando a la figura 26, y después de analizar las bajas frecuencias de las FTEs, nuevamente se agruparán estas FTEs pero ahora solamente para la banda entre 1.0 a 20 Hz, logrando agrupar la mayoría de las FTEs en cuatro familias:

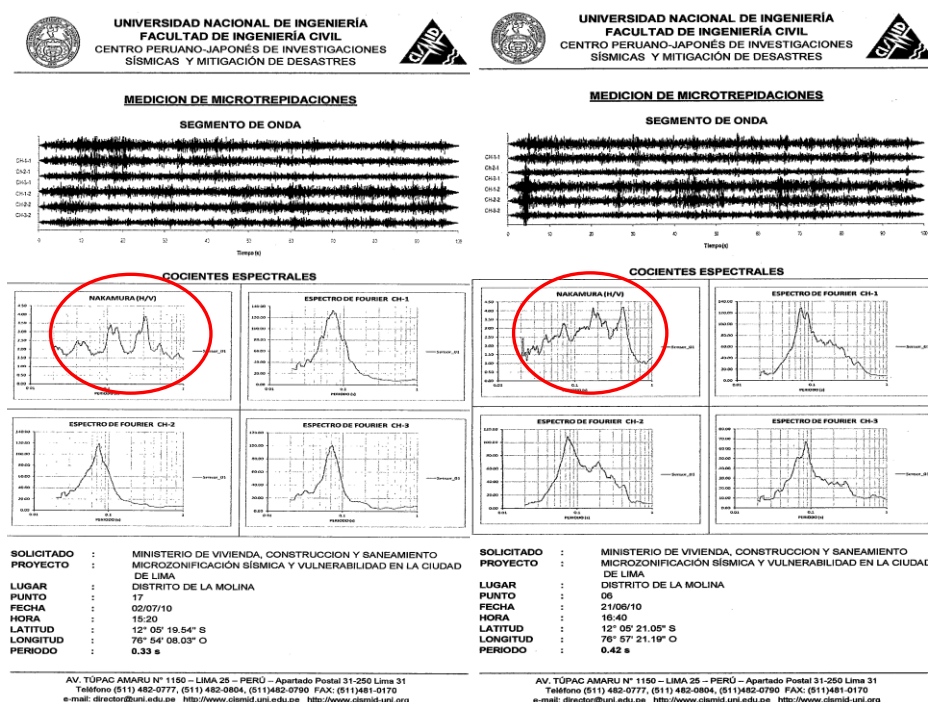
- Roca (ver figura 26, parte intermedia, lado izquierdo): Esta familia, no muestra ninguna amplificación en la banda de frecuencias entre 1.0 a 20 Hz, por lo tanto, muestran que esta zona es firme o rocosa. De acuerdo con la microzonificación geotécnica y sísmica desarrollada por el CISMID, 2010, esta zona corresponde a la zona de los cerros que bordean la ZONA I.
- Familia I (ver figura 26, parte intermedia, lado derecho): Como podemos notar en esta figura, tenemos una amplificación relativa mayores a dos veces en la banda de frecuencias de 6 a 20 Hz, ósea entre 0.16 a 0.05 segundos (promedio 0.10 segundos). De acuerdo con la microzonificación geotécnica y sísmica desarrollada por el CISMID (2010), esta zona corresponde a la descripción de la Zona I, ya que está conformada por las laderas de los cerros donde existen afloramientos rocosos o estratos gravosos de origen coluvial y pequeño espesor (entre 0 a 10 m, figura 35), los cuales presentan una buena capacidad portante, así como el comportamiento dinámico de los suelos presenta en promedio el mismo periodo dominante y su amplificación relativa como se puede observar en la figura 26. Sin embargo, no debe confundirse con sus límites geográficos, ya que como se verá más adelante (figura 50), sus límites de esta zona (ZONA I) son diferentes a los límites del mapa de microzonificación geotecnia y sísmica desarrollados por el CISMIDC (figura 3 y 4).
- Familia II (ver figura 26, parte inferior, lado izquierdo): Como podemos notar en esta figura, tenemos una amplificación relativa mayores a dos veces en la banda de frecuencias de 3 a 6 Hz, ósea entre 0.33 a 0.16 segundos (promedio 0.22 segundos). De acuerdo con la microzonificación geotécnica y sísmica desarrollada por el CISMID (2010), esta zona corresponde a la descripción de las Zonas II y III, que abarca la zona relativamente plana, que se extiende desde el pie de las laderas hacia la zona del valle, conformada predominantemente por suelos gravosos coluviales y estratos de arena mal graduada de moderado espesor entre 10 a 25 m, figura 35), así como también terrenos de fundación conformado por la grava aluvial del río Rímac, que en este sector conforma una transición con los depósitos de suelos arenosos y finos profundos localizados en la parte central del distrito.
- Familia III (ver figura 26, parte inferior, lado derecho): Como podemos notar en esta figura, tenemos una amplificación relativa mayores a dos veces en la banda de frecuencias de 1.5 a 3 Hz, ósea entre 0.66 a 0.33 segundos (promedio 0.4 segundos). De acuerdo con la microzonificación geotécnica y sísmica desarrollada por el CISMID (2010), esta zona corresponde a la descripción de la Zona IV, que abarca la parte central y más profunda de valle, conformado mayormente por suelos finos y arenosos de gran potencia entre 25 a >40 m, figura 35). Está conformada por la mayor parte de las urbanizaciones La Molina Vieja, La UNALM La Molina, El Haras y Las Lagunas.

Finalmente, de acuerdo a estos resultados en el siguiente capítulo se desarrollarán los mapas de isoperiodos, de amplificación relativa y el de isopacas al estrato resistente.

### 7.3 Desarrollo de los mapas de isoperíodos, amplificación relativa e isopacas para el distrito de La Molina

Los mapas de isoperíodos actualmente son utilizados en las normas técnicas complementarias para diseño sísmico, como es el caso del reglamento de la ciudad de México. Como podemos observar, para generar estos mapas solo se toma un dato de las FTE: la frecuencia o periodo asociado a la máxima amplitud. Ya sea hacia bajas frecuencias (entre 0.1 a 1.0 Hz) o hacia altas frecuencias (1.0 a 10 Hz). Sin embargo, conlleva a muchos problemas en la interpretación cuando se presentan varios máximos de aproximadamente la misma amplitud; ya sea la FTE obtenida con la técnica NHVSR o EHVS, o con otras técnicas ya discutidas en clase como la SSR (razón espectral estándar, Borchardt, 1970). Estas FTE son la respuesta del suelo desde 0.1 a 20 Hz, y debe interpretarse toda la función, ya que una buena interpretación nos dirá qué tipo de estratigrafía existe debajo del sitio. Cuanto más simple es la FTE, será evidente de si se trata de un solo paquete o depósito sedimentario. Por el contrario, si tiene varios máximos con diferentes amplitudes nos dirá que debajo de ese lugar se tiene una estratigrafía más compleja, probablemente con depósitos de baja velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ). Por otro lado, cuando las FTE presentan una amplitud que permanece menor a las 1.33 veces de amplificación relativa entre 0.1 a 20 Hz, entonces se trata de una roca o depósito firme, donde los valores de  $V_s$  serán mayores a los 700 m/s (Sánchez Sesma et. al., 2011).

En ese sentido, para desarrollar el mapa de isoperíodos para el distrito de La Molina, se tomaron los 28 sitios analizados en este trabajo, más los 35 lugares analizados por el CISMID (2011), Sifuentes (2012) y SENSICO (2017) con registros de ruido sísmico o Microtremores; así como otros cinco lugares interpretados por Ríos (2018) usando registros de sismos de estaciones acelerograficas que se encuentran en la zona. Los valores de periodo dominante y su amplificación relativa obtenidos de estos trabajos, fueron directamente tomados de sus gráficas, como se muestra en la figura 30 (CISMID, 2011, Sifuentes, 2012).



En la parte superior de la figura 30, podemos observar los registros de Microtremores para las tres componentes en los dos puntos (puntos 17 y 06) obtenidos por el CISMID (2011), y la parte inferior sus espectros de amplitud de Fourier, así como la interpretación del H/V mostrados por los círculos rojos. Como podemos notar, en las dos gráficas, la curva H/V muestran dos picos claros. La pregunta es cuál de ellas tomar ¿?; como se puede observar probablemente Sifuentes (2012), busco el que tenía mayor amplitud. Sin embargo, nosotros interpretamos los dos picos; por ejemplo, para la gráfica de la izquierda, el pico asociado a 0.1 segundos, sería el modo de vibrar del primer estrato más superficial; mientras que el segundo pico (0.33 segundos) estaría asociado a un estrato más profundo. Para la gráfica de la parte derecha, tenemos el mismo caso, un máximo espectral asociado a un estrato más superficial (0.2 segundos) y el otro a un estrato más profundo (0.42 segundos).

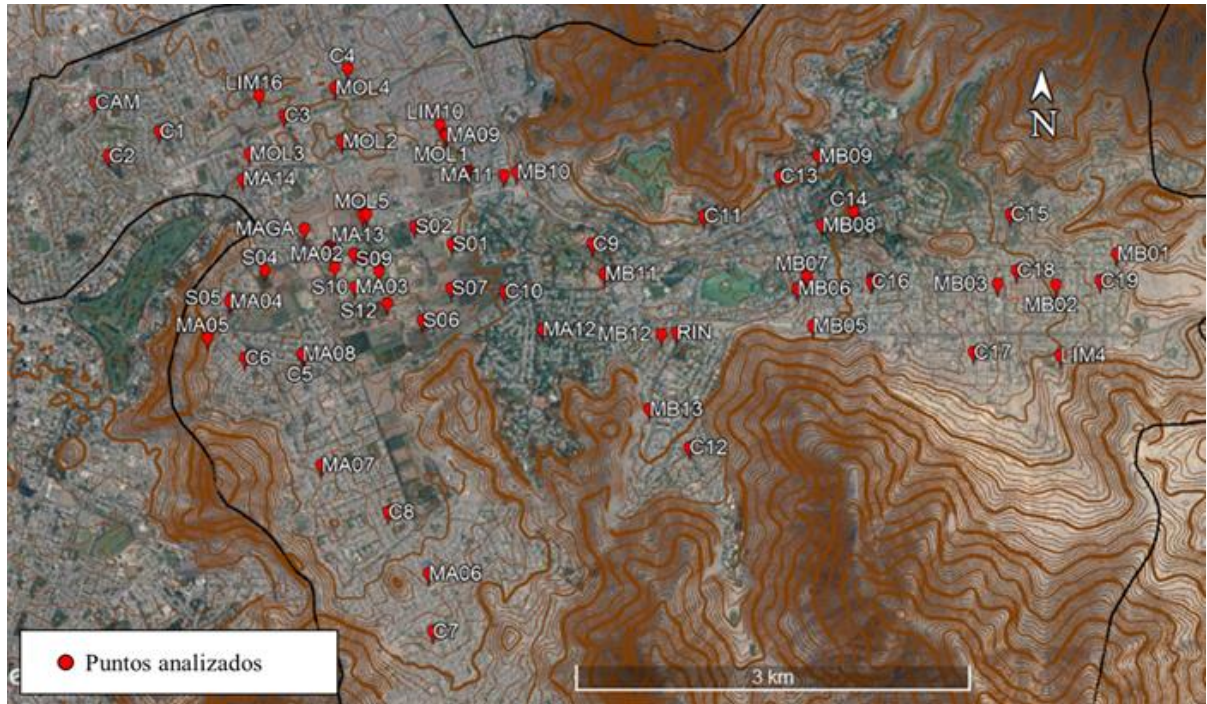
En total se juntaron 68 sitios con valores del periodo dominantes, cuya distribución se muestra en la Figura 31. Si ahora los máximos reinterpretados, como se mostró en la figura 30 y tomando en cuenta la clasificación de las cuatro familias que se interpretaron (figura 26) y analizaron; estos máximos son puestos en las coordenadas de cada uno de los 68 puntos analizados, incluyendo los sitios donde la frecuencia o periodo dominante es 0.0 Hz o 0.0 segundos se construyó un mapa de periodos dominantes o isoperiodos, como se muestra en la figura 32, donde la primera curva está asociada a 0.0 segundos, la cual bordea a los lomeríos. A partir de esta curva mencionada, se han trazado curvas cada 0.05 segundos, llegando hasta el valor de 1.0 segundos en el extremo noroeste del distrito de La Molina. También se muestra con puntos rojos los 68 sitios donde se tiene una estimación del periodo dominante.

Por otro lado, cada valor de periodo dominante, presenta un valor de su amplificación relativa, la cual también se presenta con curvas de igual amplificación relativa, o isoamplitudes. Este mapa se mostrada en la figura 33, donde las curvas de igual amplitud van de una vez de amplificación hasta 13 veces, con divisiones cada 0.5 veces de amplitud relativa. Nuevamente observamos que las mayores amplificaciones ocurren en la misma zona donde los periodos son mayores, que es la parte noroeste del distrito de La Molina.

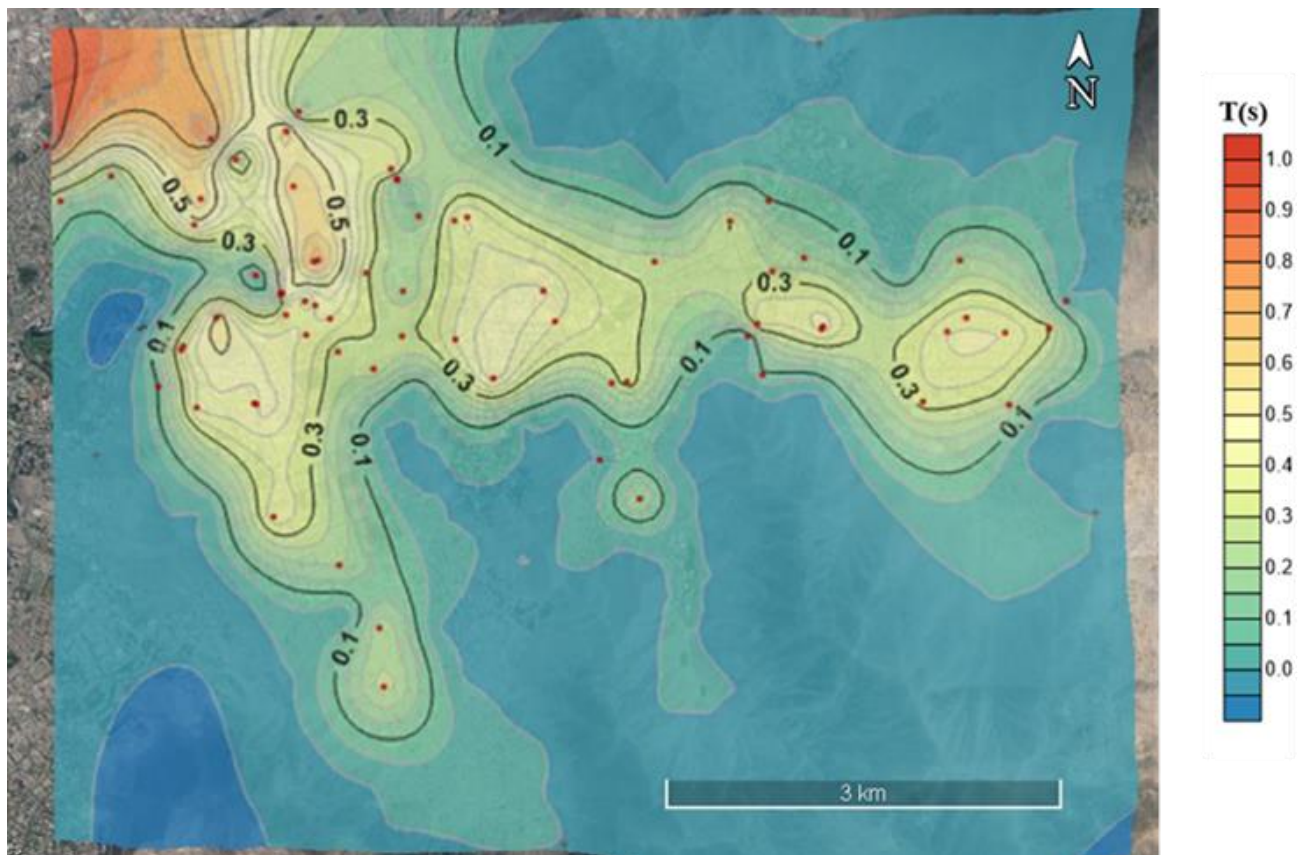
Finalmente, otro mapa que se puede desarrollar con los valores del periodo dominante, es utilizando la ecuación 6.4 de este trabajo ( $To=4H/\beta$ ), donde  $To$ , es el periodo,  $H$  es el espesor al estrato firme, en este caso al conglomerado mencionado ya en varios perfiles (figuras 28 y 29) y  $\beta$ , es la velocidad de ondas de corte, que en este caso le daremos un valor promedio de  $\beta= 300$  m/s, para estimar el valor de  $H$  en los 68 sitios donde se tiene una estimación del periodo dominante ( $To$ ), logrando configurar nuevamente un mapa de igual profundidad al estrato resistente, el cual se muestra en la Figura 34, donde nuevamente tenemos curvas que van desde 0 hasta los 75 metros de profundidad, nuevamente en la misma zona donde tenemos los valores mayores de periodo dominante, amplificación relativa y ahora valores hasta de 75 metros al conglomerado, que este caso es la zona noroeste del distrito de La Molina.

Si juntamos estos tres mapas, y otros valores como el PGA (se verá en el siguiente capítulo) podremos definir por fin nuestro mapa de *microzonificación sísmica* para el distrito de La Molina, y compararlo con el mapa desarrollo el CISMID. Este tema se discute al final del curso.



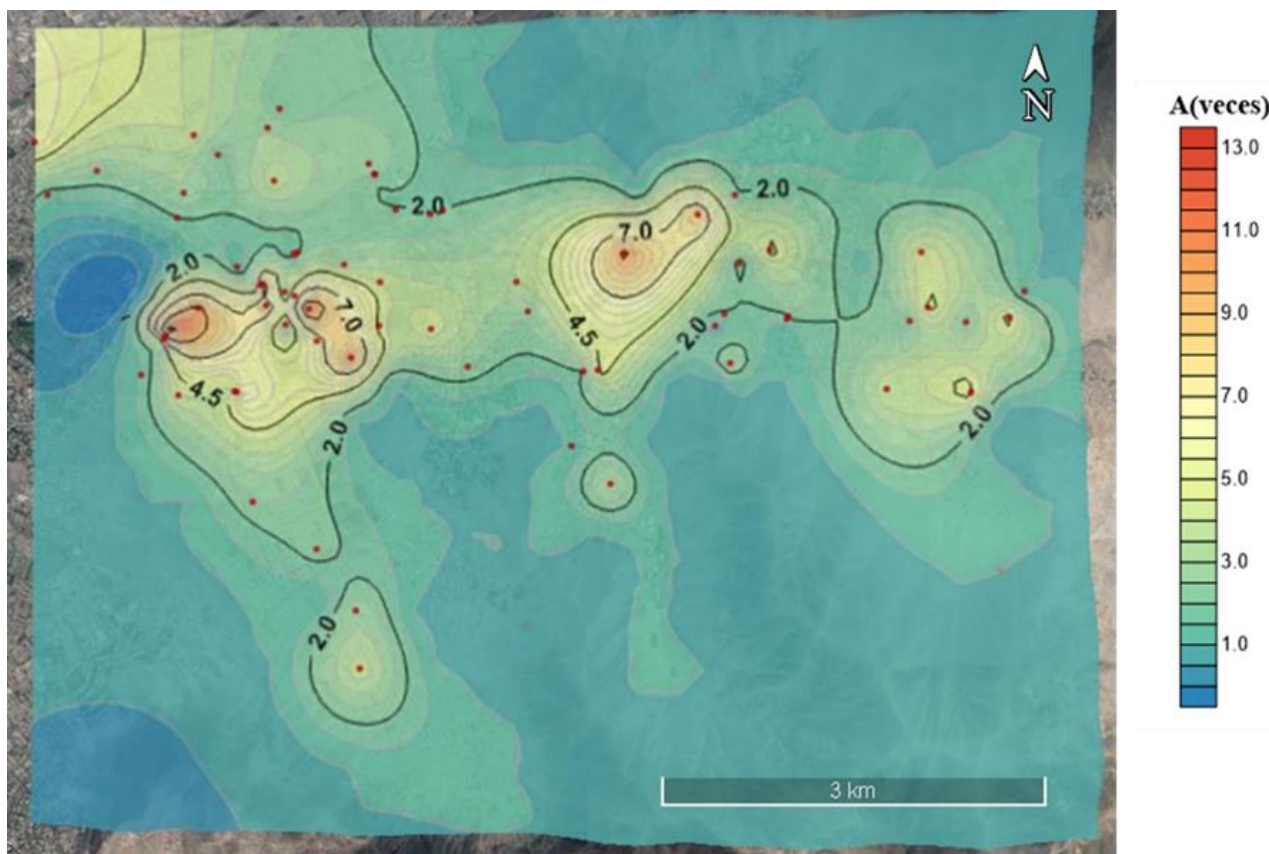


**Figura 31.** Puntos de monitoreo con los que se obtuvieron los mapas de isoperiodos, isoamplitudes e isopacas.

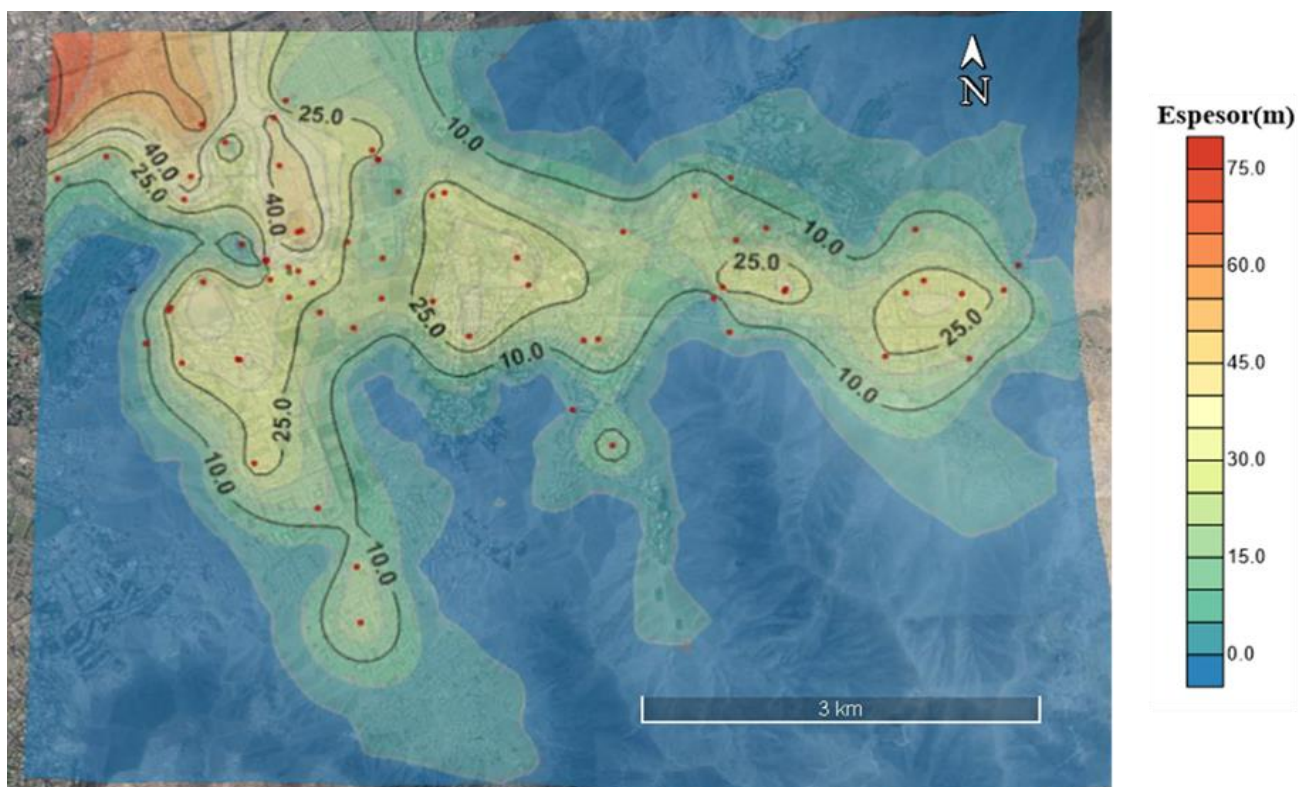


**Figura 32.** Mapa de isoperiodos o periodos predominantes en el distrito de La Molina.





*Figura 33. Mapa de isoamplitudes para el distrito de La Molina.*



*Figura 34. Mapa de isopacas o isoespesores para el distrito de La Molina.*

## 8 ESCENARIOS SÍSMICOS

Dentro del contexto de nuestra investigación, un escenario sísmico es un mapa que muestra la distribución espacial de las aceleraciones espectrales esperadas para un período estructural dado con un terremoto específico de magnitud  $M$  a cierta distancia, evaluado determinísticamente. En cualquier caso, tomar en cuenta los efectos del sitio debe ser similar tanto en enfoques deterministas como probabilísticos. Para este fin, caracterizamos los movimientos sísmicos del suelo en sitios seleccionados a partir de las relaciones espectrales en estos lugares.

Aplicando la Teoría de Vibración Aleatoria (TVA) (Cartwright y Longuet, 1956), obtuvimos espectros de respuesta de pseudoaceleración. El uso de esta teoría ofrece una forma eficiente de predecir los movimientos máximos a partir del conocimiento del espectro de potencia (Boore y Joyner, 1982). Para usar esta teoría se requiere el espectro de amplitud de aceleración para un evento sísmico dado ( $C(f)$ ), así como la duración de la serie de tiempo de aceleración registrada ( $T$ ) y la función de transferencia en cualquier sitio particular ( $F_j(f)$ ). La ecuación 8.1 relaciona estas variables.

$$A(f) = C(f) F_j(f) T \quad (8.1)$$

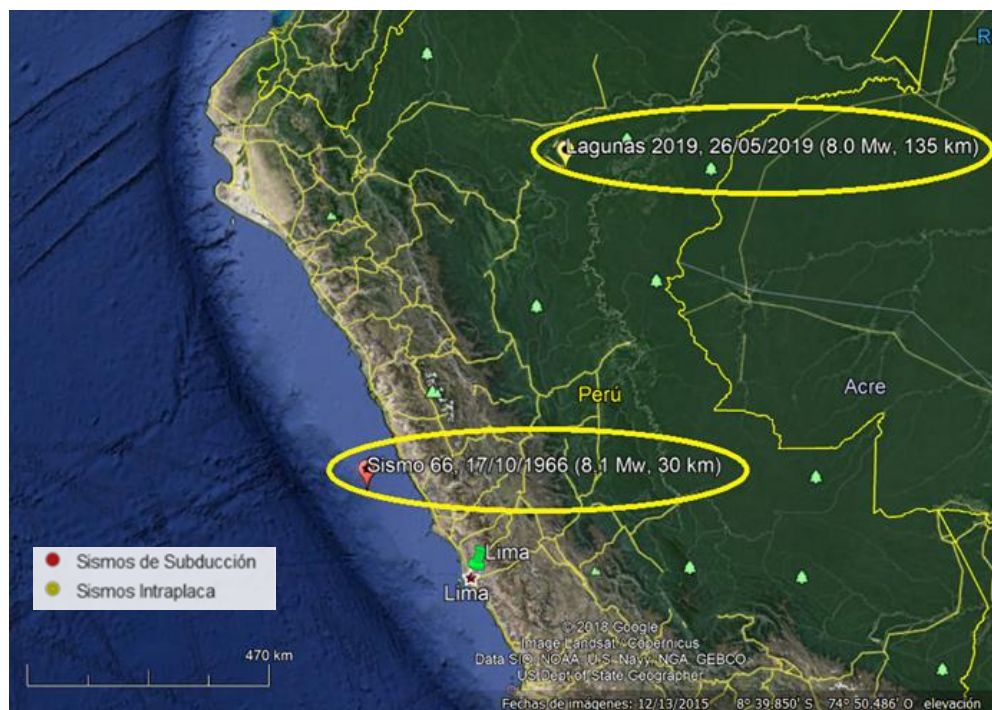
La teoría lineal afirma que la función de transferencia es necesaria para evaluar el espectro de Fourier en un sitio al convolucionarlo con un movimiento de entrada dado en una posición de referencia. Tradicionalmente, la estación de referencia es un sitio de terreno firme. En la Ciudad de Lima, la estación de referencia ha sido Naña; sin embargo, esta estación no ha registrado los dos sismos que vamos a utilizar en este estudio, por lo tanto, utilizaremos la estación PQR que si tiene varios registros históricos.

### 8.1 Estación Acelerográfica PQR y LIM01

Los dos terremotos utilizados en este trabajo para generar los escenarios sísmicos fueron registrados en la estación Acelerográfica PQR y LIM001, respectivamente, de la ciudad de Lima. Estos son: el terremoto del 17 de octubre de 1966 ( $M_w 8.1$ ), de hipocentro con profundidad de 24 km ubicado a 236 km de la ciudad de Lima; y el del 26 de mayo de 2019 ( $M_w 8.0$ ), denominado sismo de Lagunas, ocurrido en Alto Amazonas, Loreto, Perú con hipocentro a una profundidad de 135 km y a 760 km de la ciudad de Lima (figura 35, elipses amarillas). El registro del sismo de 1966 pertenece a la antigua estación del parque de la reserva (PQR) que poseía acelerómetros analógicos cuyos datos se digitalizaban a una frecuencia de 50 Hz. El registro del 2019, por el contrario, pertenece a una estación más moderna ubicada en la Universidad Nacional de Ingeniería, llamada LIM001, que posee acelerómetros digitales con una frecuencia de muestreo de 200 Hz. Esta información se encuentra disponible y es de libre descarga desde la página del CISMID. Las características de los sismos mencionados se muestran en la figura 35 y la Tabla 8.1.

**Tabla 8-1:** Características de los sismos de 1966 y 2019 registrados en las estaciones PQR y LIM001, respectivamente.

Estación	PQR	LIM001
Fechas	17 de Octubre 1966	26 de Mayo 2019
Magnitud	8.1 Mw	8.0 Mw
Origen Sismogénico	Subducción	Intraplaca
Dist. Epicentral	236 km	760 km
Profundidad	24 km	135 km
PGA	268 cm/s <sup>2</sup>	31.41 cm/s <sup>2</sup>



**Figura 35.** Mapa con distribución de los terremotos que mayor daño han provocado a la ciudad de Lima.

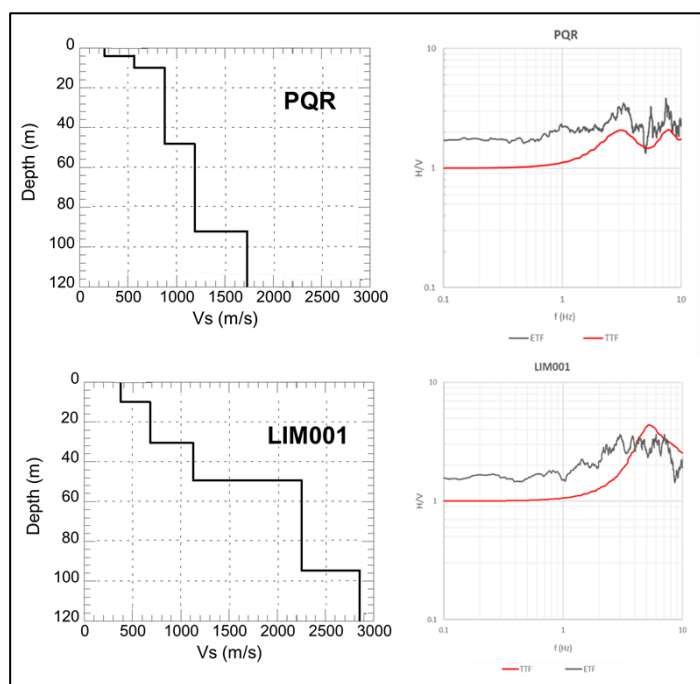
## 8.2 Procedimiento para obtener los acelerogramas en roca de estos dos terremotos

La elaboración de escenarios sísmicos consiste en estimar los niveles de aceleración que habrían alcanzado las estructuras de La Molina para diversos periodos durante los sismos de 1966 y 2019. Para esto, se descargan los registros de ambos sismos medidos en superficie y se deconvolucionan de modo que se obtiene una señal sintética en roca siguiendo el procedimiento descrito en la parte inferior. Por último, estas señales en roca son convolucionadas de acuerdo a la función de transferencia empírica de cada punto en que se ha hecho medición de ruido.

Como las estaciones iniciales (PQR y LIM001) tienen efecto de sitio, entonces se obtendrán su FTE utilizando los registros de distintos terremotos. Las FTE obtenidas al aplicar la técnica de EHVSr obtenidas por Ríos (2018) como parte de su tesis de maestría se



compararán con FTT obtenidas usando modelos corticales sísmicos de estas mismas estaciones (Figura 36). Estos perfiles estratigráficos con valores de velocidad de corte hasta los 120 metros fueron obtenidos por Calderón (2014), como parte de su tesis doctoral, usando arreglos de banda ancha y obteniendo curvas de dispersión, como se puede observar en la figura 36. Utilizando el método de Haskell (Haskell, 1962) y el modelo sísmico mencionado (Tablas 8.2 y 8.3), se obtuvo la FTT, para incidencia vertical de ondas SH. Esta curva de transferencia teórica se muestra en la figura 36 con una línea de color rojo, mientras que las FTE obtenidas con registros sísmicos para las mismas estaciones aplicando la técnica EHVSr, se muestran con líneas de color gris. Dado el buen ajuste entre ambas, esas funciones fueron utilizadas para deconvolucionar los registros de los dos terremotos para obtener un sismograma en roca. Posteriormente, utilizando la Teoría de Vibración Aleatoria (TVA) (Cartwright y Longuet, 1956) ya mencionada, se obtuvieron los acelerogramas para las componentes horizontales más energéticas, como se muestran en la figura 37. En ella, como ejemplo, se muestra el acelerograma y su espectro de Fourier en superficie y roca para el terremoto del 17 octubre de 1966 (Mw8.1).



**Figura 36.** Perfil estratigráfico desarrollado para la estación PQR por D. Calderón (2014)

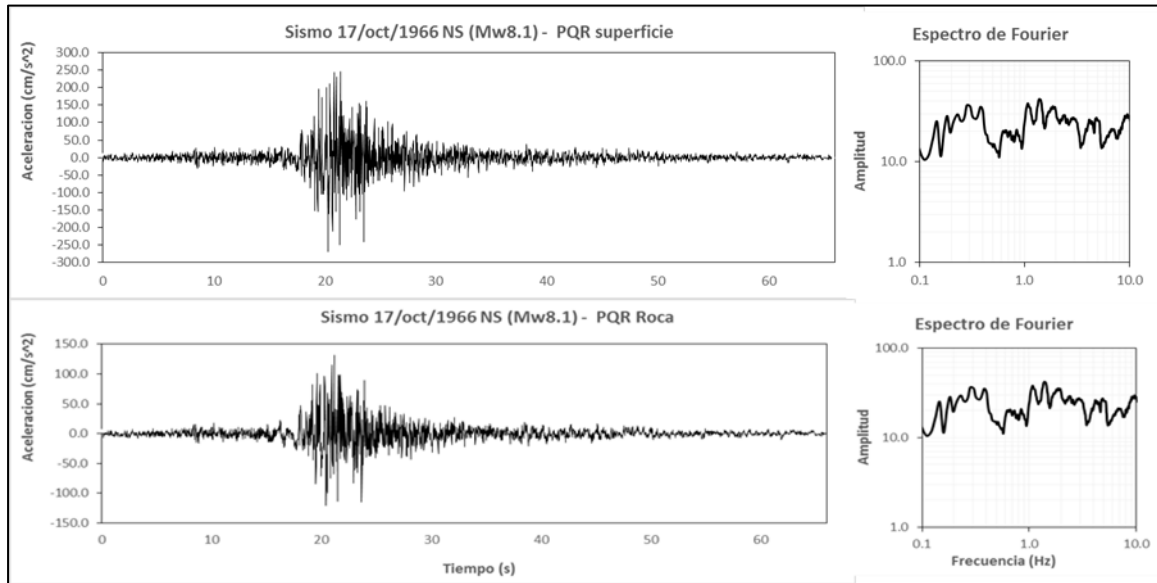
**Tabla 8-2:** Modelo sísmico de la estratigrafía en la estación acelográfica PQR.

Estrato	H (m)	Vs (m/s)	Amort (%)	Dens (g/cm <sup>3</sup> )
1	2	350	3	2.3
2	10	550	2	2.3
3	36	870	2	2.3
4	47	1200	2	2.3
5	BEDROCK	1720	1	2.7



**Tabla 8-3:** Modelo sísmico de la estratigrafía en la estación acelográfica LIM001.

Estrato	H (m)	Vs (m/s)	Amort (%)	Dens(g/cm <sup>3</sup> )
1	10	370	2	2.3
2	15	680	2	2.3
3	20	1620	2	2.3
4	50	2250	2	2.3
5	BEDROCK	2850	2	2.7

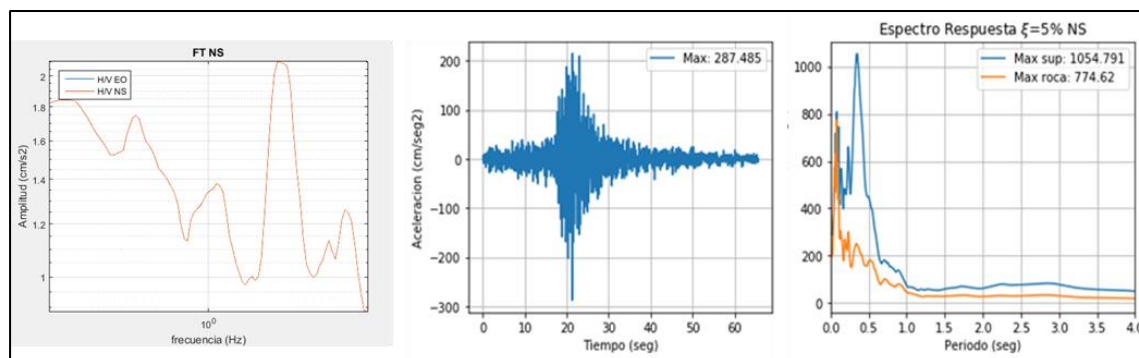


**Figura 37.** Parte superior, acelerogramas y espectros de Fourier en superficie y roca para el terremoto del 17 octubre de 1966 (Mw8.1).

### 8.3 Procedimiento para la determinación de acelerogramas sintéticos para cada uno de los 28 puntos analizados.

Continuando con la elaboración de los escenarios sísmicos, ahora que ya se tienen las señales en roca para los dos sismos evaluados, se procede a convolucionarlos con las funciones de transferencia empírica (FTE) de cada punto. Se obtiene como resultado acelerogramas sintéticos en las distintas zonas evaluadas en La Molina.

Para ilustrar este procedimiento se seleccionó la FTE del punto MA-07 de la Familia III, la cual se muestra en la figura 38 de color rojo. Si convolucionamos esta FTE con el registro en roca del terremoto del 17 de octubre de 1966 (ver figura 38), obtendremos como resultado un nuevo acelerograma sintético para el sitio MA-07, el cual se muestra en la figura 38 con valores cercanos a los 300 gales, junto con su espectro de respuesta con 5% de amortiguamiento, donde podemos resaltar el valor de la aceleración máxima (1054.8 cm/s<sup>2</sup>), cerca al periodo de 0.4 segundos. Este valor está asociado al modo de vibrar de estructuras de 4 y 5 pisos. De igual forma se han obtenido los acelerogramas sintéticos para los otros sitios.



**Figura 38.** Parte izquierda, FTE para el punto MA-07 de la zona III. Parte centro y derecha, Acelerogramas sintético y su espectro de respuesta para el 5 % de amortiguamiento para el terremoto del 17 octubre de 1966 (Mw8.1) simulado para el sitio MA-07.

## 8.4 Mapas de intensidad sísmica o aceleraciones máximas del suelo y estructuras con $T=0.2$ y $0.4$ segundos para los terremotos de 1966 y 2019

Para fines de establecer espectros de diseño sísmico se requiere, para el sitio de interés, contar con la caracterización adecuada de las intensidades sísmicas. En rigor, lo anterior se puede lograr con estudios de peligro sísmico que proporcionan los niveles más probables de las intensidades que se pueden presentar en el sitio. En tales estudios se deben incluir las diferentes fuentes sismogénicas que afectan al sitio de interés y deben generarse muestras representativas de historias detalladas del movimiento del terreno, con características adecuadas de amplitudes y contenido de frecuencias. Tanto las amplitudes como los contenidos de frecuencias dependen de la fuente sismogénica, de la trayectoria que siguen las ondas sísmicas hasta el sitio y de las propiedades dinámicas del terreno.

El escenario sísmico es una herramienta de planeación que nos ayuda a entender los sismos y planificar acciones de prevención futuras frente a los efectos de estos en las ciudades. Los escenarios sísmicos nos brindan la oportunidad de estudiar el riesgo sísmico respecto de las características de los mismos (magnitud, ubicación y origen), de los suelos, tipos de edificios y características de la población de una zona en específico. Esto nos permitirá determinar el impacto de un determinado evento en las zonas en estudio, lo cual ayudará a las autoridades a tomar de decisiones y a visualizar el impacto que tendrán en las zonas analizadas

En caso del presente informe definiremos dos escenarios sísmicos correspondientes a los sismos del 17 de octubre de 1966 cuyo epicentro estuvo ubicado en las costas de Lima, y el sismo del 29 de mayo de 2019 que tuvo su epicentro en Alto Amazonas Loreto; y el área de estudio será el distrito de la Molina ubicado en la ciudad de Lima. Estos sismos fueron seleccionados debido a que el sismo de 1966 es el de mayor magnitud registrado en Perú (8.1 Mw) y representa a los sismos producidos por la subducción de la placa de nazca bajo la placa sudamericana. Asimismo, el sismo de Lagunas de 2019 (8.0 Mw) es el sismo intraplaca de mayor magnitud registrado en los últimos años.

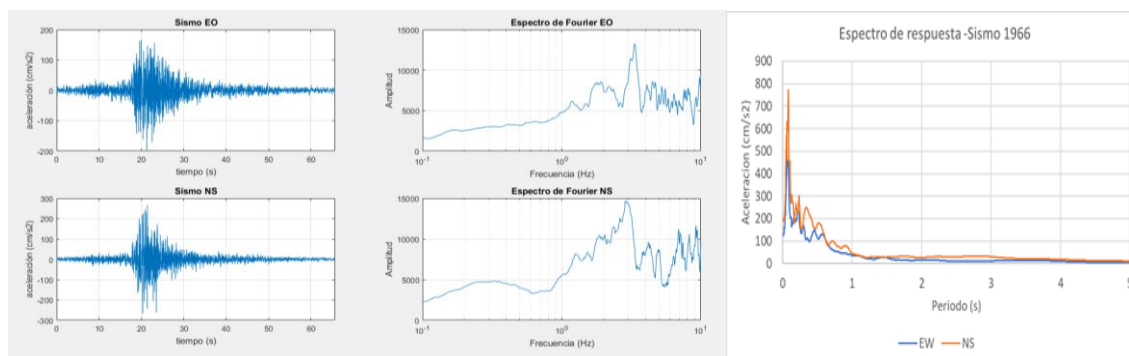
En las siguientes tablas (8-4 y 8-5) y figuras 39 y 40, se muestran las características de los dos terremotos que se utilizaran en este estudio.

## Características de los sismos en estudio

### a. Sismo de 1966

**Tabla 8-4** Características del sismo de 1966 (fuente IGP)

Fecha	17 de octubre de 1966
Magnitud	8.1 Mw
Distancia al epicentro (km)	236
PGA (gals)	268
Profundidad (km)	30

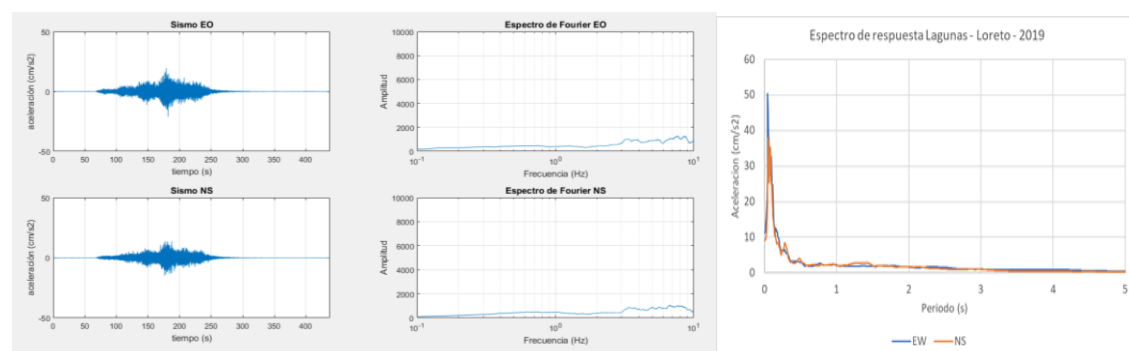


**Figura 39.** Registros sísmicos, sus espectros de Fourier y espectros de respuesta para sus dos componentes (EO, NS) en la estación PQR del terremoto de 1966.

### b. Sismo de Lagunas - Loreto

**Tabla 8-5** Características del sismo de Lagunas – Loreto (fuente IGP)

Fecha	26 de mayo de 2019
Magnitud	8 Mw
Distancia al epicentro (km)	700
PGA (gals)	10
Profundidad (km)	135 km

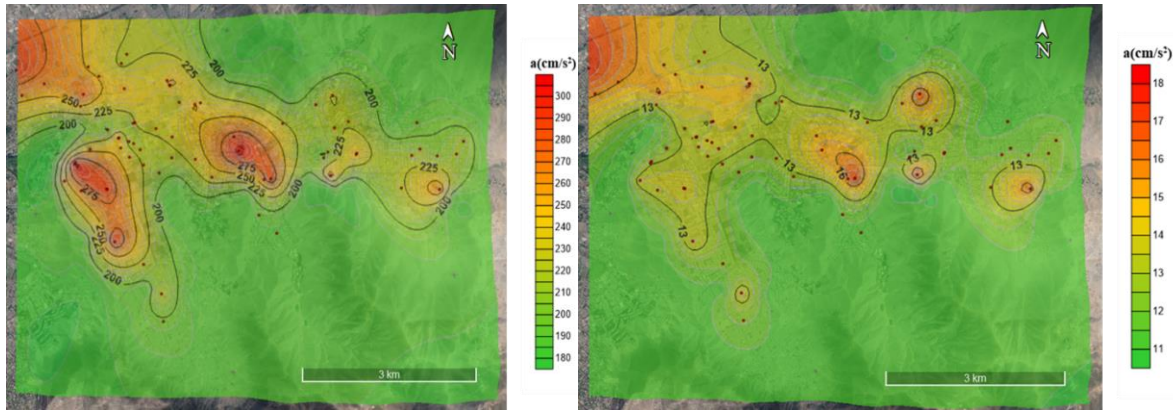


**Figura 40.** Registro sísmico, sus espectros de Fourier y espectros de respuesta para sus dos componentes (EO, NS) en la estación LIM009 del terremoto del 2019.

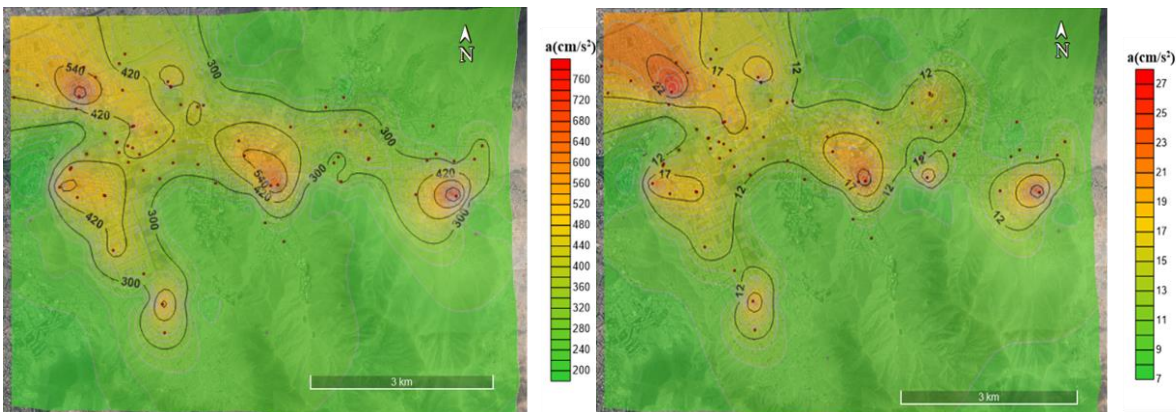
Como se mencionó, para ambos escenarios sísmicos (1966 y 2019) se obtuvieron acelerogramas en roca los que junto a las funciones de transferencia empíricas obtenidas en

cada lugar (H/V) permitieron determinar acelerogramas sintéticos, espectros de Fourier y espectros de respuesta para los 28 puntos evaluados. Para el cálculo sistematizado se utilizó el código Matlab elaborado por Ríos (2018) en su tesis de maestría.

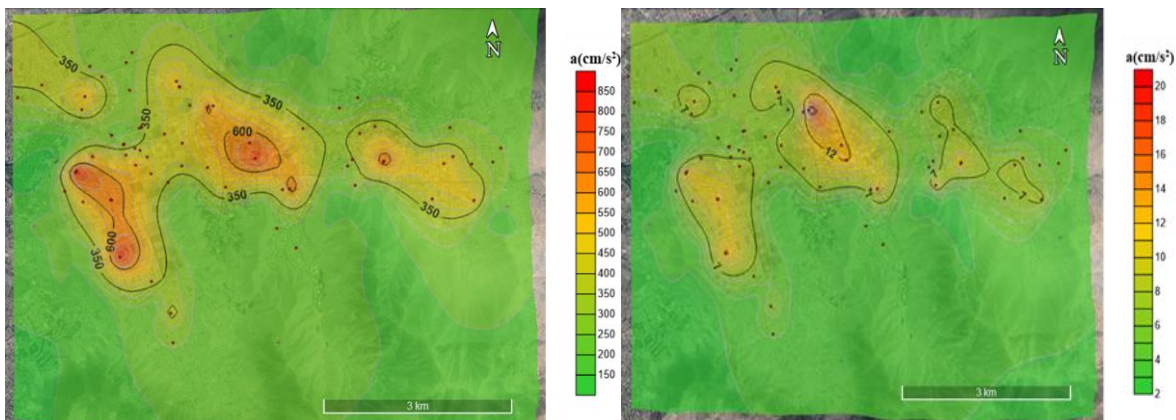
De los espectros de repuesta se determinan los mapas de escenario sísmico para el distrito de la Molina, en estos se muestra las aceleraciones para los PGA y periodos de 0.2 y 0.4 segundos respectivamente tal como se muestra en las figuras 41 a la 43.



**Figura 41.** Escenarios sísmicos del distrito de la Molina. Parte izquierda, aceleración PGA del sismo de 1966. Parte derecha, aceleración PGA del sismo de Lagunas 2019.



**Figura 42.** Escenarios sísmicos del distrito de la Molina. Parte izquierda, aceleración para estructuras con periodos de  $T=0.2$  s para el sismo de 1966. Parte derecha, aceleración para estructuras con periodos de  $T=0.2$  s para el sismo de Lagunas 2019.



**Figura 43.** Escenarios sísmicos del distrito de la Molina. Parte izquierda, aceleración para estructuras con periodos de  $T=0.4$  s para el sismo de 1966. Parte derecha, aceleración para estructuras con periodos de  $T=0.4$  s para el sismo de Lagunas 2019.



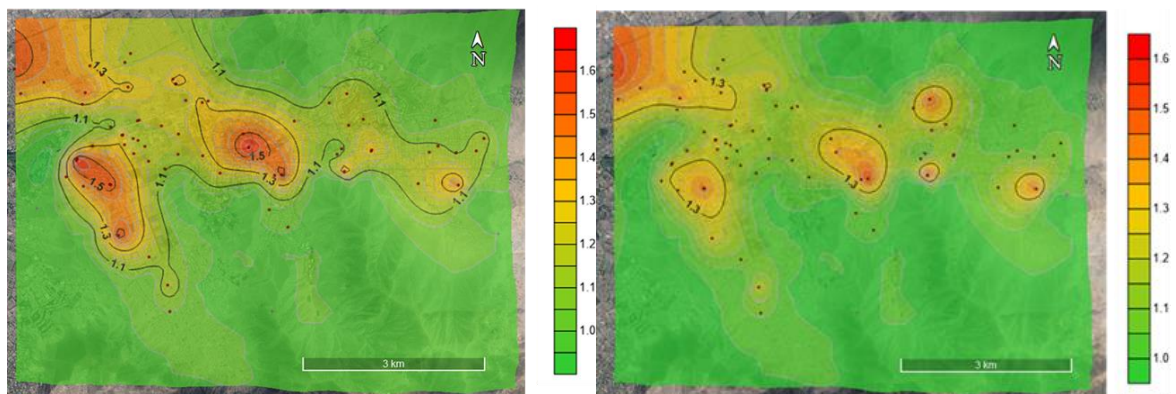
Como se puede observar en estas figuras, las aceleraciones para los sismos de 1966 son mucho mayores que las calculadas para el sismo de Lagunas 2019 tal como se muestra en las escalas gráficas. Esto debido a la cercanía del epicentro del sismo 1966 y el distrito de la Molina.

Los valores de aceleración en las zonas más bajas de la cuenca son mayores a las aceleraciones obtenidas en zonas aledañas a los cerros debido a que en estas zonas aparentemente el estrato rocoso se encuentra a menor altura. En estos sitios, los estratos de suelo son pequeños respecto a los ubicados en la parte central del valle, esto puede también ser verificado en el mapa de isopacas (Figura 34), el cual muestra el espesor estratigráfico del distrito de la Molina.

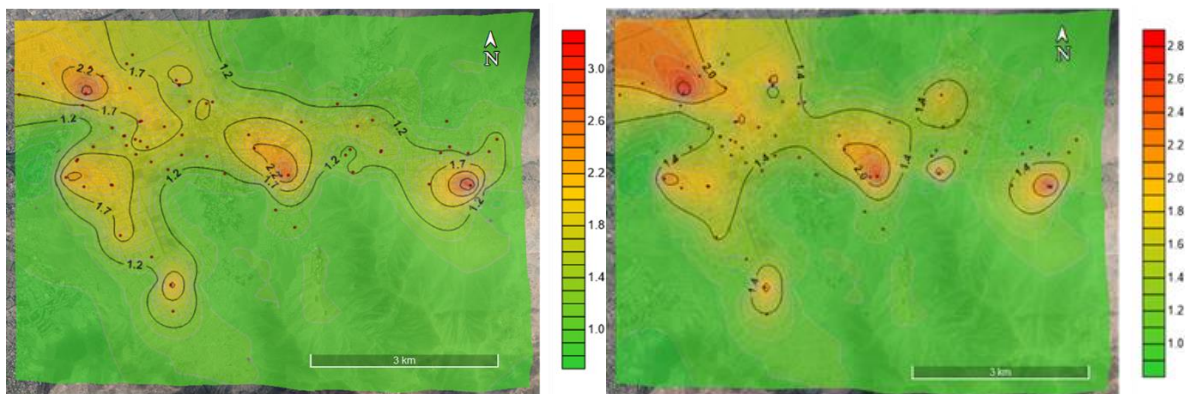
## 8.5 Factores de Amplificación

### 8.5.1 Factores de amplificación respecto a valores en roca

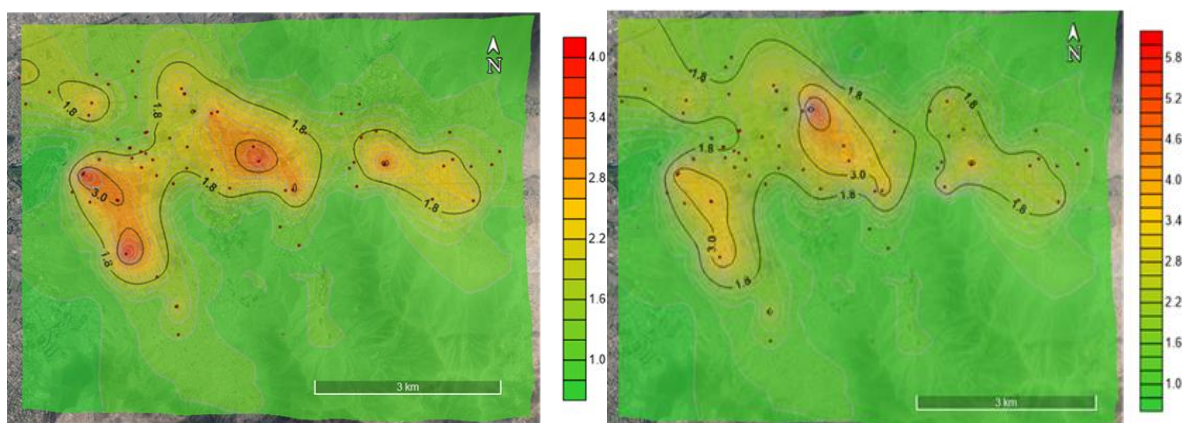
Se presentan **mapas de amplificación** respecto a valores en roca, representados por los valores obtenidos con los acelerogramas deconvolucionados al basamento rocoso de los sismos de 1966 y 2019. Estos mapas fueron elaborados teniendo como base las aceleraciones máximas obtenidas en los escenarios sísmicos presentados anteriormente (PGA,  $T=0.2$  s y  $T=0.4$  s), dividiéndolos con los respectivos valores en roca en cada uno de los 28 puntos evaluados. A continuación, en las figuras 44 a la 46 se muestran las curvas de factor de amplificación descritas.



**Figura 44.** Parte izquierda, factor de amplificación para PGA con el sismo de 1966. Parte derecha, factor de amplificación para PGA con el sismo Lagunas 2019.



**Figura 45.** Parte izquierda, factor de amplificación para  $T=0.2$  s con el sismo de 1966. Parte derecha, factor de amplificación para  $T=0.2$  s con el sismo Lagunas 2019.



**Figura 46.** Parte izquierda, factor de amplificación para  $T=0.4$  s con el sismo de 1966. Parte derecha, factor de amplificación para  $T=0.4$  s con el sismo Lagunas 2019.

En las figuras se observa que para los valores PGA y periodos de  $T=0.2$  segundos, los factores de amplificación para los sismos de 1966 y 2019 no presentan diferencias significativas entre sus valores máximos y mínimos. Sin embargo, la distribución de las curvas presenta ciertas diferencias porque los sectores de mayor incidencia no son precisamente los mismos.

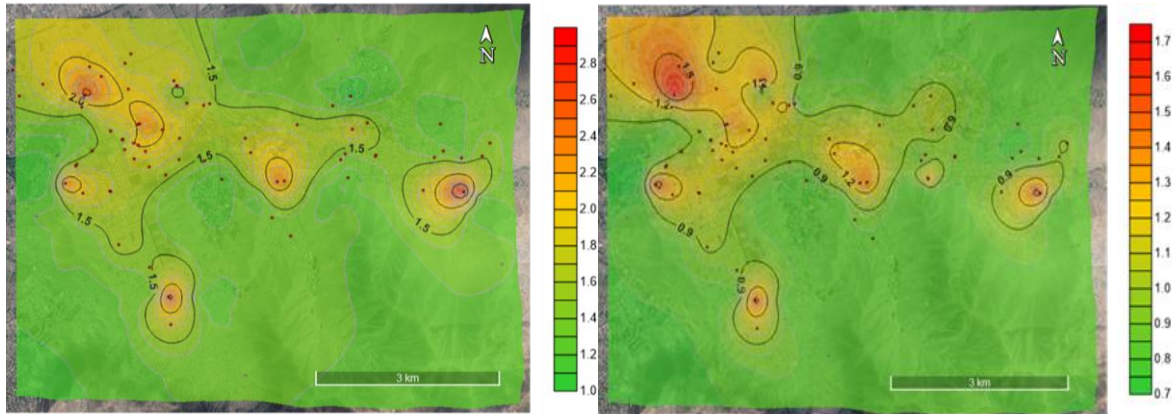
En la gráfica de factores de amplificación para el periodo de  $T=0.4$  segundos, se observa que los valores máximos del factor de amplificación del sismo de Lagunas de 2019 son un 57% mayores que los del sismo de 1966. Esto se debe a que aparentemente con el sismo de Lagunas del 2019 se presentan efectos de resonancia en algunos puntos de estudio.

Las curvas de los mapas de aceleraciones para los periodos de 0.2 y 0.4 segundos y las gráficas de los factores de amplificación para los sismos de 1966 y Lagunas de 2019, presentan diferentes formas. Esto indica que los sismos no siempre excitan uniformemente los suelos. Es decir, algunos sismos excitan con mayor intensidad algunas zonas más que otras, debido fundamentalmente a que la energía y el contenido de frecuencias con el que los sismos se transmiten desde el estrato rocoso no son siempre las mismas y a que las funciones de transferencia empíricas son diferentes en cada zona.

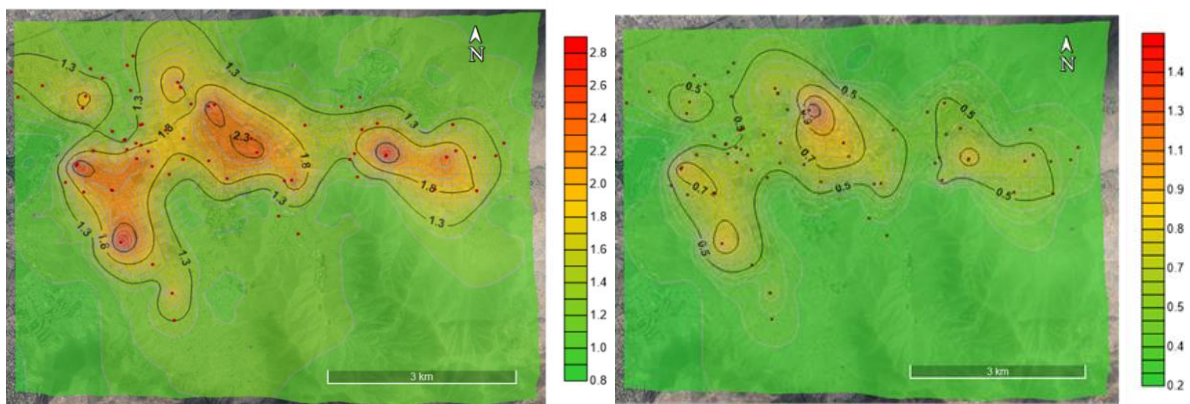
### 8.5.2 Factores de amplificación respecto a PGA

A continuación, se presentan **los mapas de factor de amplificación** respecto a valores de aceleración del suelo. Estos gráficos fueron calculados teniendo como base las aceleraciones del suelo (PGA) en cada punto obtenido de los acelerogramas sintéticos convolucionados tanto con el sismo de 1966 como el del 2019. Los mapas son elaborados utilizando el cociente de la aceleración estructural para los periodos  $T=0.2$  seg y  $T=0.4$  seg respecto a las aceleraciones del suelo (PGA) en los 28 puntos de estudio. De esta manera se puede hacer una validación en el distrito de La Molina del factor de amplificación sísmica del espectro de diseño propuesto por la normal E.030.

En las figuras 47 y 48 se muestran las curvas de amplificación descritas.



**Figura 47.** Parte izquierda, mapa con el factor de amplificación ( $T=0.2$ )/PGA para el sismo de 1966. Parte derecha, mapa con el factor de amplificación ( $T=0.2$ )/PGA con el sismo Lagunas 2019.



**Figura 48.** Parte izquierda, mapa con el factor de amplificación ( $T=0.4$ ) / PGA para el sismo de 1966. Parte derecha, mapa con el factor de amplificación ( $T=0.4$ ) / PGA con el sismo Lagunas 2019.

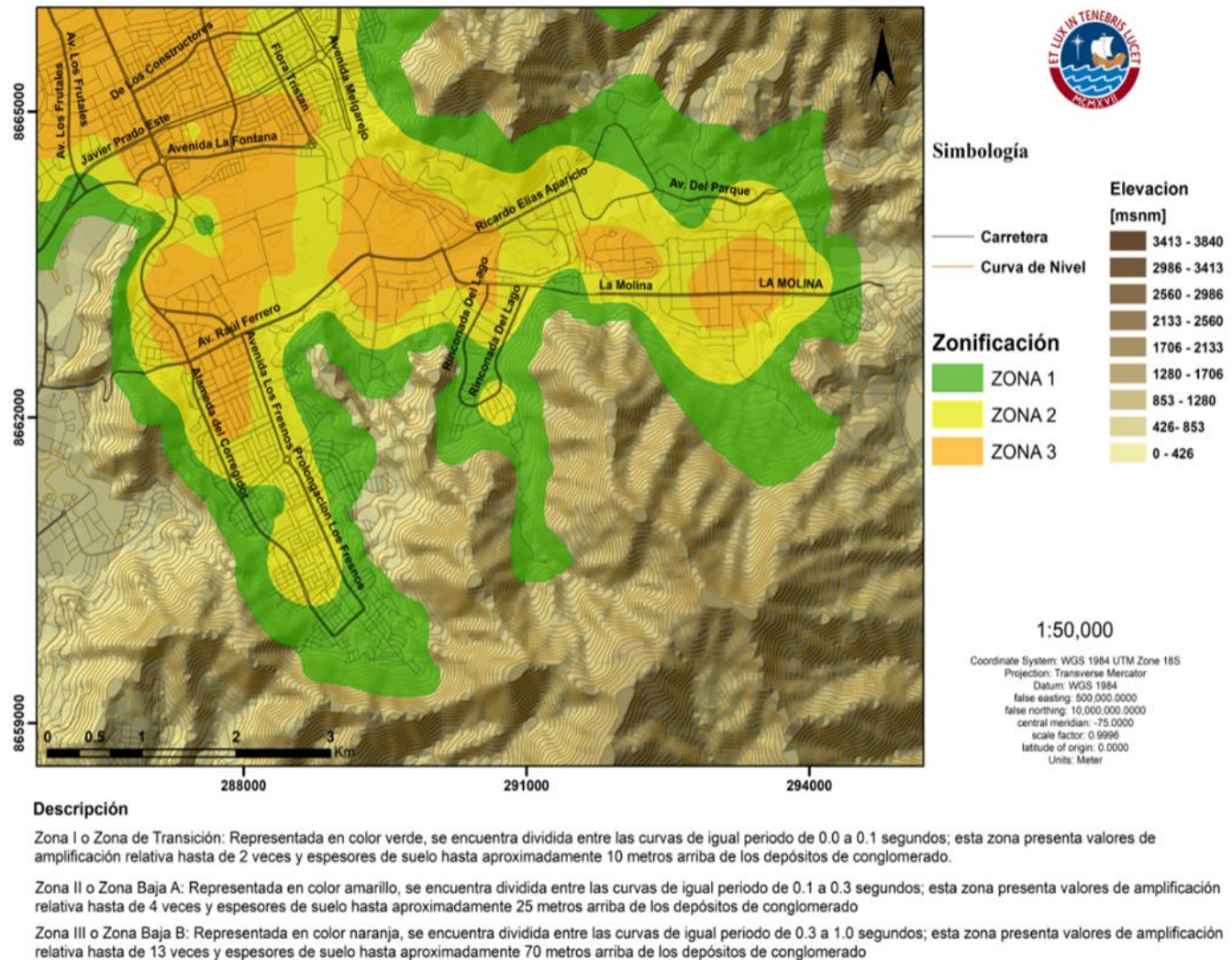
## 9 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para generar un mapa de microzonificación sísmica se tiene que partir del parámetro más importante que caracteriza los diferentes tipos de suelos, y este es su periodo dominante que (generalmente) no varía con el tiempo. Esta experiencia se aprendió después de los terremotos destructores como los de Niigata (1964), México (19 de septiembre de 1985 y 2017), Loma Prieta (1989), Kobe (1995), Taiwán (1999), etc, revelo una estrecha relación entre la distribución de los daños y la distribución de los periodos dominantes del suelo. Por tal razón en la norma complementaria para diseño sísmico del Reglamento de Construcciones del 2004 para la Ciudad de México, aparece el primer mapa de isoperiodos, también conocido como el mapa de zonificación sísmica. La importancia de este mapa radica en la prevención para que los periodos de las estructuras no coincidan con los periodos dominantes del suelo, evitando así la resonancia y el daño de las construcciones.

Tomando en cuenta la experiencia de la Ciudad de México, en este estudio utilizaremos el mapa de isoperiodos desarrollado con los 68 sitios con valores del periodo dominantes, cuya



distribución y análisis se muestra en la Figura 32, para dividir en cuatro zonas sísmicas el distrito de La Molina, como se muestra en la siguiente figura 49:



**Figura 49.** Microzonificación sísmica para el distrito de La Molina, propuesta en este estudio.

Cuyas características describiremos a continuación:

**Zona de Lomas:** Esta zona que abarca todos los cerros y lomeríos que bordean a la zona I o zona de transición, se muestra en la figura 49. Esta zona que tiene el color café (curvas de igual altitud), la cual está bordeando la zona I o zona de transición de color verde, cuyos límites entre esta zona de Lomas y la de Transición es la curva de igual periodo de 0.0 segundos. Las características de las FTEs para esta zona, queda representada como la familia espectral denominada como **Roca** (figura 26), donde las FTEs no muestra ninguna amplificación en la banda de frecuencias entre 1.0 a 20 Hz, por lo tanto, muestran que esta zona es firme o rocosa. De acuerdo con la microzonificación geotécnica y sísmica desarrollada por el CISMID (2010), esta zona corresponde a la zona de los cerros que bordean la ZONA I, asociadas a lugares con presencia de suelos coluviales o rocosos.

**Zona I o Zona de Transición:** Esta zona de Transición, representada en color verde en la figura 49, se encuentra dividida entre las curvas de igual periodo de 0.0 a 0.1 segundos (ver

figura 32). De acuerdo a la figura 33 y 34, esta zona presenta valores de amplificación relativa hasta de 2 veces y espesores de suelo hasta aproximadamente 10 metros arriba de los depósitos de conglomerado, tomando en cuenta un valor promedio de  $\beta = 300$  m/s para el suelo, como ya se mencionó en el capítulo 7.3.

En la figura 26, esta zona tiene las características de la Familia I, donde tenemos una amplificación relativa mayores a dos veces en la banda de frecuencias de 6 a 20 Hz, ósea entre 0.16 a 0.05 segundos (promedio 0.10 segundos). De acuerdo con la microzonificación geotécnica y sísmica desarrollada por el CISMID (2010), esta zona corresponde a la descripción de la Zona I, ya que está conformada por las laderas de los cerros donde existen afloramientos rocosos o estratos gravosos de origen coluvial y pequeño espesor (figura 3 y 4).

**Zona II o Zona Baja A:** Esta zona, representada en color amarillo en la figura 49, se encuentra dividida entre las curvas de igual periodo de 0.1 a 0.3 segundos (ver figura 32). De acuerdo a la figura 33 y 34, esta zona presenta valores de amplificación relativa hasta de 4 veces y espesores de suelo hasta aproximadamente 25 metros arriba de los depósitos de conglomerado, tomando en cuenta un valor promedio de  $\beta = 300$  m/s para el suelo, como ya se mencionó en el capítulo 7.3.

En la figura 26, esta zona tiene las características de la Familia II, y de acuerdo con la microzonificación geotécnica y sísmica desarrollada por el CISMID (2010), esta zona corresponde a la descripción de las Zonas II y III (figura 3 y 4), que abarca la zona relativamente plana, que se extiende desde el pie de las laderas hacia la zona del valle, conformada predominantemente por suelos gravosos coluviales y estratos de arena mal graduada de moderado espesor entre 10 a 25 m, así como también terrenos de fundación conformado por la grava aluvial del río Rímac, que en este sector conforma una transición con los depósitos de suelos arenosos y finos profundos localizados en la parte central del distrito.

**Zona III o Zona Baja B:** Esta zona, representada en color naranja en la figura 49, se encuentra dividida entre las curvas de igual periodo de 0.3 a 1.0 segundos (ver figura 32). De acuerdo a la figura 33 y 34, esta zona presenta valores de amplificación relativa hasta de 13 veces y espesores de suelo hasta aproximadamente 70 metros arriba de los depósitos de conglomerado, tomando en cuenta un valor promedio de  $\beta = 300$  m/s para el suelo, como ya se mencionó en el capítulo 7.3.

En la figura 26, esta zona tiene las características de la Familia III, y de acuerdo con la microzonificación geotécnica y sísmica desarrollada por el CISMID (2010), esta zona corresponde a la descripción de la Zona IV, que abarca la parte central y más profunda de valle, conformado mayormente por suelos finos y arenosos de gran potencia.

Los factores de amplificación propuestos para las tres zonas definidas para el distrito de La Molina son las mostradas en la siguiente Tabla 9-1 y Tabla 9-2:



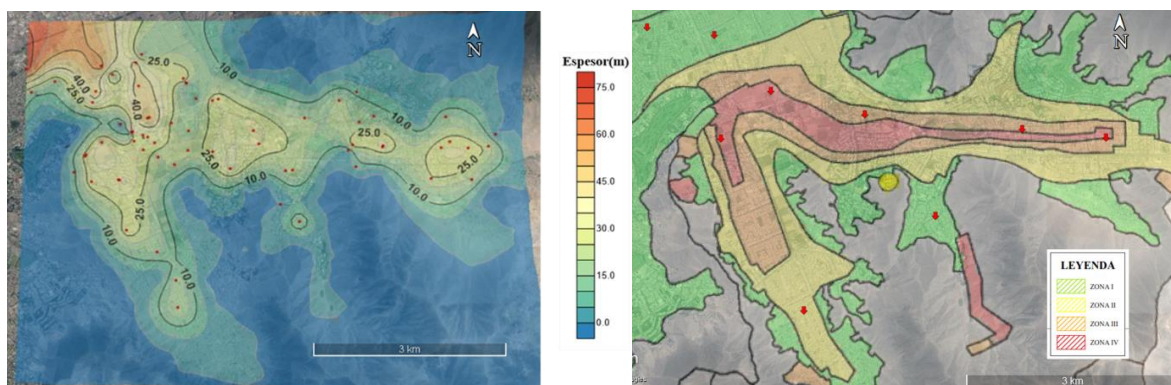
**Tabla 9-1.** Factores de amplificación por tipo de suelo

	ZONA I	ZONA II	ZONA III
<b>PGA 1966</b>	1.1 – 1.2	1.2 – 1.4	1.4 – 1.5
<b>PGA 2019</b>	1.1 – 1.4	1.1 – 1.65	1.2 – 1.55
<b>Periodo 0.2s-1966</b>	1.1 – 2.0	2.0 – 3.3	2.0 – 3.3
<b>Periodo 0.2s-2019</b>	1.1 – 2.3	2.0 – 3.0	2.0 – 3.0
<b>Periodo 0.4s-1966</b>	1.1 – 1.5	1.5 – 2.8	2.0 – 3.8
<b>Periodo 0.4s-2019</b>	1.2 – 2.2	2.0 – 3.2	2.0 – 6.0

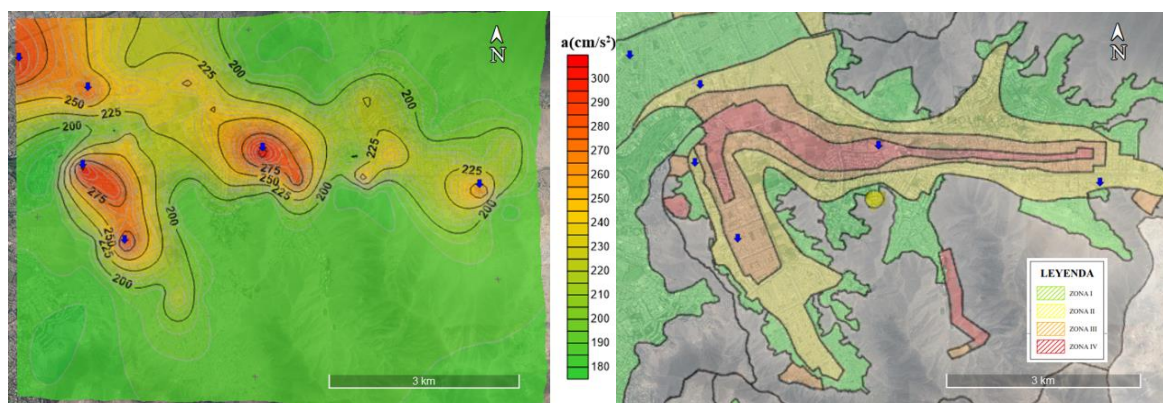
**Tabla 9-2** Comparación de amplitudes relativas H/V

	CISMID 2010	PUCP 2019
ZONA I	1 – 2	1 - 2
ZONA II	2 – 4	2 - 4
ZONA III	4 – 5	4 - 8
ZONA IV	Mayor a 5	4 - 12

El mapa de isopacas indica que la profundidad del suelo llega hasta los 70 metros en la zona III, parte noroeste. Asimismo, el mapa de amplitudes demuestra que el efecto de la amplificación es un fenómeno complejo que involucra muchas variables: evento sísmico, geología, tipo de suelo, profundidad y periodo predominante; y no necesariamente es mayor cuando el periodo del suelo es mayor, como se demuestra en las figuras 50 y 51.



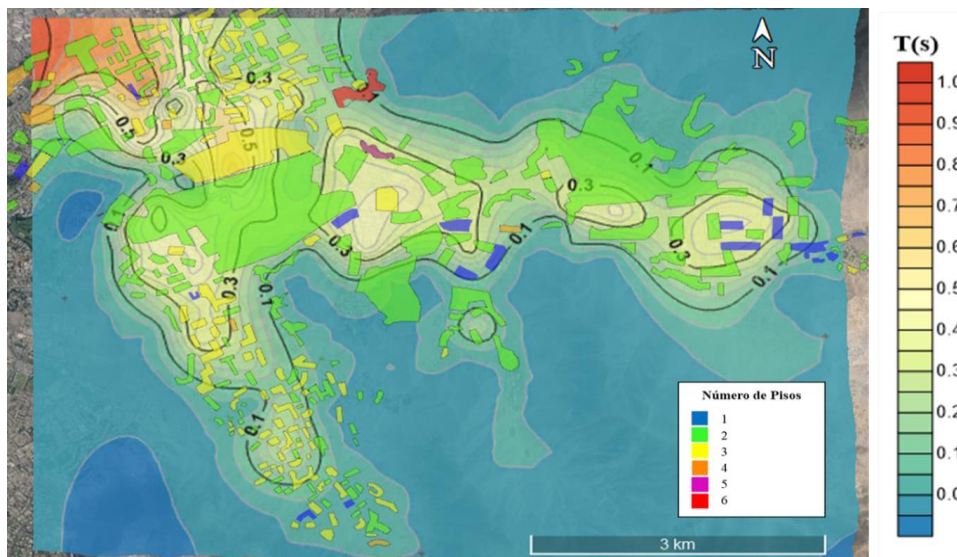
**Figura 50.** Comparación Mapa de Isopacas y Microzonificación CISMID (Puntos de ubicación en rojo).



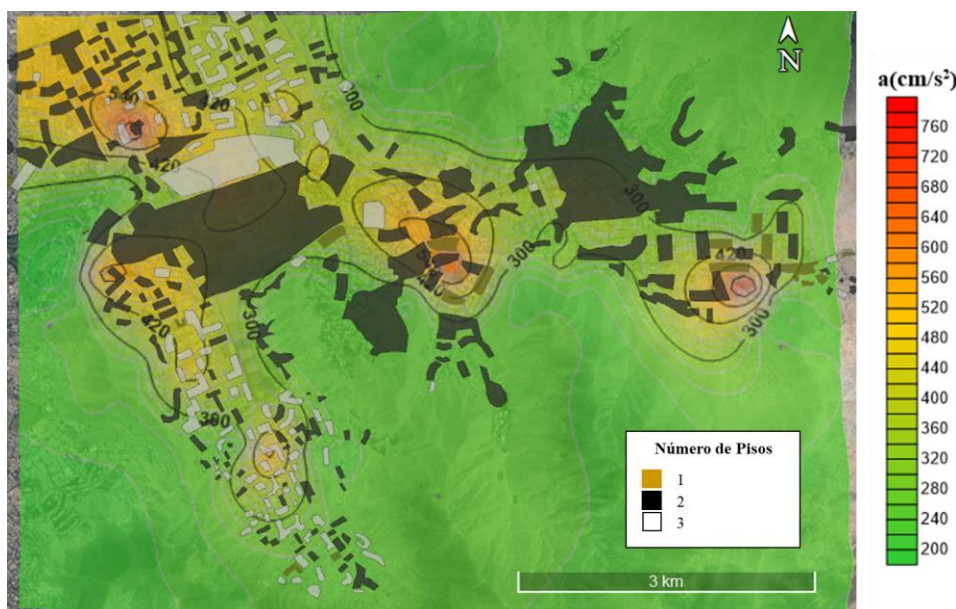
**Figura 51.** Superposición Mapa PGA (Sismo 1966) y Microzonificación CISMID (Puntos de ubicación en azul).



Respecto al escenario sísmico de 1966, la aceleración máxima del suelo resulta  $305 \text{ cm/s}^2$  ( $0.31g$ ) el cual se produce en la zona III según CISMID. Considerando el informe de vulnerabilidad del CISMID, la vivienda predominante en el distrito de la Molina es una estructura de mampostería con diafragma rígido de dos pisos. Entonces asumiendo un periodo estructural de  $0.2s$  para estas viviendas, el sismo involucra una aceleración espectral promedio de  $500 \text{ cm/s}^2$ . Esto se muestra en las figuras 52 y 53.



**Figura 52.** Superposición Mapa Isoperíodos y Número de Pisos.



**Figura 53.** Superposición  $T=0.2$  (Sismo 66) y Número de Pisos

La Norma Técnica Peruana E.030, considera el factor S para clasificar los tipos de suelo como se indica en la Tabla 9-3. De esta manera, asigna periodos predominantes de hasta  $0.3$  para roca dura,  $0.4$  para suelo rígido,  $0.6$  para suelo intermedio, y  $1.0$  para suelo blando. Se determinaron los factores de amplificación por tipo de suelo en ambos escenarios (Figura 44). Para el sismo de 1966, la mayor amplificación se produce en la zona III según CISMID

( $T > 0.4s$ ) con valores de 1.5 – 1.65 y para el sismo de 1919 las mayores amplificaciones se producen en la zona II ( $T=0.1 - 0.2 s$ ) con valores de 1.1 – 1.65. Según la norma, si se considera un tipo de suelo blando, S3 ( $T_p = 1.0$ ), correspondería un factor de amplificación de 1.375 (respecto a roca), lo que subestima los valores obtenidos. Para estructuras con periodos de 0.2s, el factor de amplificación llega hasta 3.0 (Figura 54); y para estructuras con periodos de 0.4s, el factor de amplificación llega hasta 6.0. Lo último se produce debido a la resonancia entre el periodo estructural y el periodo predominante del suelo.

Tabla 9-3 Tabla por tipo de suelo NTP E030

Tabla N° 3 FACTOR DE SUELO "S"				
SUELO ZONA	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
Z <sub>4</sub>	0,80	1,00	1,05	1,10
Z <sub>3</sub>	0,80	1,00	1,15	1,20
Z <sub>2</sub>	0,80	1,00	1,20	1,40
Z <sub>1</sub>	0,80	1,00	1,60	2,00

Tabla N° 4 PERÍODOS "T <sub>P</sub> " Y "T <sub>L</sub> "				
	Perfil de suelo			
	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
T <sub>P</sub> (s)	0,3	0,4	0,6	1,0
T <sub>L</sub> (s)	3,0	2,5	2,0	1,6

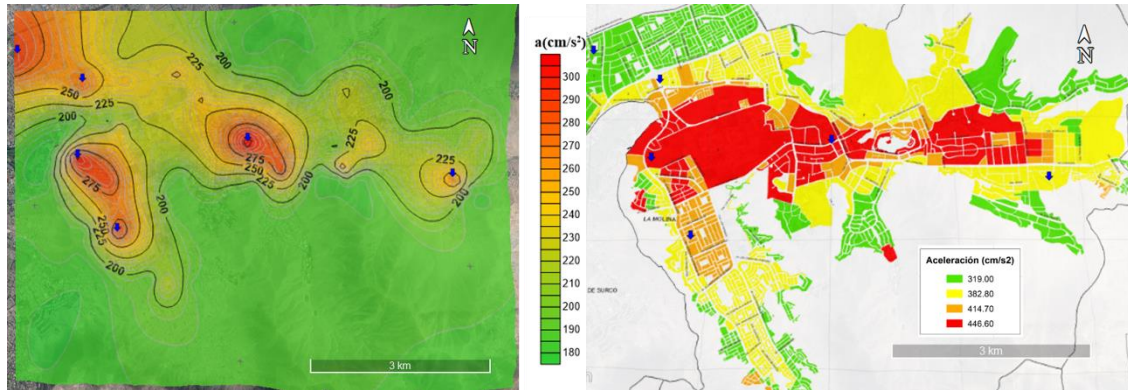


Figura 54. Superposición mapa factor de amplificación respecto a roca para  $T=0.2 s$  con el sismo de 1966 y Número de Pisos.

Finalmente, si comparamos el mapa de aceleraciones PGA para el sismo de 1966 obtenido en este estudio (figura 55, parte izquierda) versus el mapa de aceleraciones que muestra el CISMID para el distrito de La Molina (figura 55, parte derecha), vemos que el mapa desarrolla por el CISMID sobre evalúa este valor y además muestra que toda la zona IV tiene ese sobre valor; mientras que nuestro mapa muestra solo seis sitios tendrían ese valor de

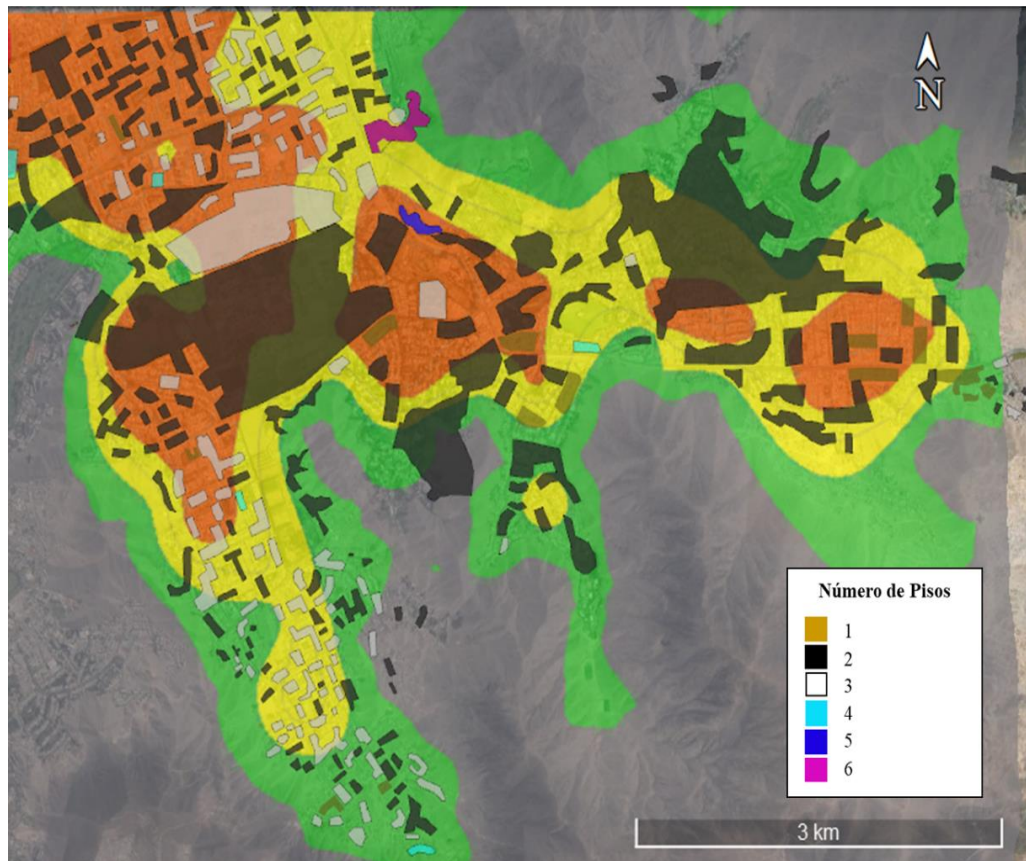


aproximadamente 300 gales si ocurriera nuevamente un sismo parecido al temblor de 1966. Estos mismos seis sitios también presentan los valores mayores en periodo dominante (figura 32), amplificación relativa (figura 33) y espesor del suelo al estrato resistente (figura 34), lo que nos muestra una vez más la congruencia de estos resultados.



**Figura 55.** Comparación mapa PGA (Sismo 1966) y mapa aceleraciones CISMID para el distrito de La Molina.

Por último, en la figura 56 se muestra la microzonificación sísmica propuesta y la distribución espacial del número de pisos de las viviendas construidas en este distrito, resaltando que la zona de mayor vulnerabilidad en cuanto a las viviendas y que existe una gran probabilidad de que se produzca resonancia entre los modos de vibrar de las estructuras y del suelo es en la **Zona II o Zona Baja A** (solamente zona de color amarillo).



**Figura 56.** Microzonificación propuesta y Número de Pisos.



## 10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1). En este trabajo se caracterizó dinámicamente el suelo en 68 puntos del distrito mediante registros de sismos y ruido ambiental y se obtuvieron funciones de transferencia empírica utilizando la técnica del cociente espectral NHVSR o SHVSR. De esta manera, se presenta un nuevo **mapa de microzonificación sísmica** para el distrito de La Molina, con grandes diferencias al mapa desarrollado por el CISMID (2010), sobre todo en los límites de sus zonas sísmicas, que en esta ocasión si toma en cuenta el parámetro principal para su limitación; que son las curvas de igual periodo. Se dividió también en cuatro zonas sísmicas: **Zona de Lomas:** En la figura 49 zona con líneas de igual altitud de color café, que abarca todos los cerros y lomeríos y bordean a la zona I o zona de transición de color verde, cuyos límites es la curva de igual periodo de 0.0 segundos; **Zona I o Zona de Transición:** En la figura 49 zona conformada por las laderas de los cerros donde existen afloramientos rocosos o estratos gravosos de origen coluvial de pequeño espesor, dividida entre las curvas de igual periodo de 0.0 a 0.1 segundos, con amplificaciones relativas de hasta de 2 veces y espesores de suelo hasta aproximadamente 10 metros arriba de los depósitos de conglomerado, tomando en cuenta un valor promedio de  $\beta = 300$  m/s para el suelo; **Zona II o Zona Baja A:** En la figura 49 zona relativamente plana, que se extiende desde el pie de las laderas hacia la zona del valle, conformada predominantemente por suelos gravosos coluviales y estratos de arena mal graduada, dividida entre las curvas de igual periodo de 0.1 a 0.3 segundos, con amplificaciones relativas de hasta de 4 veces y espesores de suelo hasta aproximadamente 25 metros arriba de los depósitos de conglomerado, tomando en cuenta un valor promedio de  $\beta = 300$  m/s para el suelo; **Zona III o Zona Baja B:** En la figura 49 zona que abarca la parte central y más profunda de valle, conformado mayormente por suelos finos y arenosos de gran potencia, dividida entre las curvas de igual periodo de 0.3 a 0.8 segundos, con amplificaciones relativas de hasta de 13 veces y espesores de suelo hasta aproximadamente 70 metros arriba de los depósitos de conglomerado, tomando en cuenta un valor promedio de  $\beta = 300$  m/s para el suelo.

2). Se generaron mapas de aceleraciones del suelo (PGA) con los sismos de 1966 (8.1 Mw) y Lagunas 2019 (8.0 Mw), así como también mapas de aceleración para construcciones con periodos estructurales de 0.2 y 0.4 segundos, viviendas típicas abundantes en el distrito. Con estos valores se desarrollaron **mapas de factor de amplificación**, utilizando el cociente de la aceleración estructural para los periodos  $T=0.2$  seg y  $T=0.4$  seg respecto a las aceleraciones del suelo (PGA) en los 28 puntos de estudio, con el objeto de validar en el distrito de La Molina el factor de amplificación sísmica del espectro de diseño propuesto por la normal E.030.

- De acuerdo con la norma E030, el factor de amplificación sísmica C para un suelo tipo S2 en períodos estructurales menores a 0.6 segundos debería ser de 2.5. Sin embargo, los valores encontrados de dividir  $S_a (T<0.6s) / PGA(T=0.0s)$  distan de este valor indicado en la norma. Para el caso de estudio, este cociente está en el orden de 2.94; es decir, 18% más alto que en la norma sísmica peruana.

**Tabla 9-1:** Factores de amplificación sísmica de la E030

<b>Tabla N° 4</b> <b>PERÍODOS “<math>T_P</math>” Y “<math>T_L</math>”</b>				
	Perfil de suelo			
	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
$T_P$ (s)	0,3	0,4	0,6	1,0
$T_L$ (s)	3,0	2,5	2,0	1,6

## 2.5 Factor de Amplificación Sísmica ( $C$ )

De acuerdo a las características de sitio, se define el factor de amplificación sísmica ( $C$ ) por las siguientes expresiones:

$$T < T_P \quad C = 2,5$$

$$T_P < T < T_L \quad C = 2,5 \cdot \left( \frac{T_P}{T} \right)$$

$$T > T_L \quad C = 2,5 \cdot \left( \frac{T_P \cdot T_L}{T^2} \right)$$

$T$  es el período de acuerdo al numeral 4.5.4, concordado con el numeral 4.6.1.

Este coeficiente se interpreta como el factor de amplificación de la aceleración estructural respecto de la aceleración en el suelo.

- A su vez, en la misma norma E030, para la Zona 4 (este trabajo Zona III o Zona Baja B), el factor de suelo  $S_2$  (1.05) es 1.31 veces el factor de la roca  $S_0$  (0.80). Realizando el mismo cálculo para el presente informe, se obtiene que el factor de suelo es de 1.39. Por lo tanto, este valor, si bien es mayor al de la norma, puede ser considerado como equivalente en términos de ingeniería.

**Tabla 9-2:** Factores de suelo de la norma E030

## 2.4 Parámetros de Sitio ( $S$ , $T_P$ y $T_L$ )

Deberá considerarse el tipo de perfil que mejor describa las condiciones locales, utilizándose los correspondientes valores del factor de amplificación del suelo  $S$  y de los períodos  $T_P$  y  $T_L$  dados en las Tablas N° 3 y N° 4.

<b>Tabla N° 3</b> <b>FACTOR DE SUELO “<math>S</math>”</b>				
<div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg);">SUELO ZONA</div>	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
$Z_4$	0,80	1,00	1,05	1,10
$Z_3$	0,80	1,00	1,15	1,20
$Z_2$	0,80	1,00	1,20	1,40
$Z_1$	0,80	1,00	1,60	2,00

- Respecto al escenario sísmico de 1966, la aceleración máxima del suelo resulta  $305 \text{ cm/s}^2$  ( $0.31g$ ) el cual se produce en la zona III según CISMID. Considerando el informe de vulnerabilidad del CISMID, la vivienda predominante en el distrito de la Molina es una estructura de mampostería con diafragma rígido de dos pisos. Entonces asumiendo un periodo estructural de 0.2s para estas viviendas, el sismo involucra una aceleración espectral promedio de  $500 \text{ cm/s}^2$  (ver figuras 52 y 53).

- Ahora, si comparamos el mapa de aceleraciones PGA para el sismo de 1966 obtenido en este estudio (figura 55, parte izquierda) versus el mapa de aceleraciones que muestra el CISMID para el distrito de La Molina (figura 55, parte derecha), vemos que el mapa desarrolla por el CISMID sobre evalúa este valor y además muestra que toda la zona IV tiene ese sobre valor; mientras que nuestro mapa muestra solo seis sitios tendrían ese valor de aproximadamente 300 gales si ocurriera nuevamente un sismo parecido al temblor de 1966. Estos mismos seis sitios también presentan los valores mayores en periodo dominante (figura 32), amplificación relativa (figura 33) y espesor del suelo al estrato.
- Por último, en la figura 56 se muestra la microzonificación sísmica propuesta y la distribución espacial del número de pisos de las viviendas construidas en este distrito, resaltando que la zona de mayor vulnerabilidad en cuanto a las viviendas y que existe una gran probabilidad de que se produzca resonancia entre los modos de vibrar de las estructuras y del suelo es en la **Zona II o Zona Baja A** (solamente zona de color amarillo).

Finalmente, se presentan las siguientes recomendaciones:

1. Los espectros de respuesta de los acelerogramas sintéticos que resultaron de la propagación del sismo de 1966 y 2019 muestran una diferencia marcada entre periodos largos y cortos. Las respuestas de amplitud máxima se muestran en los periodos cortos, esto debido a que la energía de estos dos sismos llega al suelo predominantemente con periodos cortos (0.1-0.4 segundos).
2. Debido a la considerable población y a la variedad de suelo que tiene La Molina, se recomienda que este distrito cuente con más estaciones acelerográficas que sirvan de instrumento para medir futuros sismos en esta zona.
3. De los gráficos presentados se puede notar que las respuestas y sus amplificaciones pueden verse afectadas por el ángulo de incidencia del sismo. Mientras que el sismo de 1966 llega desde la dirección Noroeste, el sismo de 2019 llega desde la dirección este.
4. Las normas sísmicas no consideran efectos de sitio por topografía ni tampoco ha sido el alcance del presente informe. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la geomorfología del lugar en estudio, así como los afloramientos rocosos de los alrededores, pueden cambiar la dinámica con que responden los suelos en sus proximidades.
5. Con el objeto de observar el comportamiento dinámico de los conglomerados, se recomienda que la medición del ruido sea de varias horas (mayor a las 6 horas) y no solo de 20 minutos como se realizó para el presente informe.

## 11. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la PUCP, en especial a la Dra. Sandra Santa Cruz, directora del programa de maestría civil, por su apoyo para la realización de este curso de capacitación y la formación de ingenieros sísmicos. Se agradece también a las licenciadas Ana Luisa Zapata y Dixi Silva, gestoras del programa, por su colaboración y apoyo logístico. Al Ing. Iván Álvarez Monroy, por su apoyo en la elaboración del mapa 29 de este trabajo.



## 12. REFERENCIAS

- Baena-Rivera, M., Perton, M., and Sánchez-Sesma, F. J., 2016, Surface waves retrieval from Generalized Diffuse Fields in 2D synthetic models of alluvial valleys, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106, 2811–2816, doi: 10.1785/0120160084.
- Boore, D. M., 1983, Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, 1865-1894
- Borcherdt, R.D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America* 60(1), 29-61.
- Campillo, M., and A. Paul (2003), Long-range correlations in the diffuse seismic coda, *Science*, 299, 547–549.
- Calderón, D., Sekiguchi, T, Nakai, S., Aguilar, Z., & Lazares, F. (2012) Study of soil amplification based on microtremor and seismic records in Lima Peru. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 12(2), 2\_1-2\_20.
- Calderón, D.; Lazares, F; Aguilar, Z; Sekiguchi, T, & Nakai, S. (2011). Estimation of Deep Soil Profiles in Lima Peru. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, Vol.5, No.7, pp. 618-627.
- CISMID (2004). Microzonificación Sísmica de Lima [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: [http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/redacis/redacis32\\_p.pdf](http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/redacis/redacis32_p.pdf).
- CISMID (2010), Microzonificación sísmica en el distrito de La Molina, pp. 47.....
- CISMID (2012). Actualización de la microzonificación sísmica de la ciudad de Lima. The international symposium for CISMID 25th Anniversary. Paper n ts-6-1.
- CISMID (2016). Development of a Seismic Microzoning Map for Lima City and Callao, Perú. *Journal of Disaster Research* Vol, 9(6), 939.
- DeMets C., Gordon R., Aarhus A., Stein S., (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International* 101 Pag. 425-278
- Finn, W. D. L., 1991, Geotechnical engineering aspects of microzonation, *Proc, Fourth Int, Conf. on Seismic Zonation*, Stanford, California, I, 199-259.
- Geopsy (2017) Recuperado de [www.geopsy.org](http://www.geopsy.org)
- Google Maps (2018) Recuperado de [www.maps.google.com](http://www.maps.google.com)
- Gutiérrez, C. and Singh, S. K., 1992, A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: comparison of results, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 42-63.
- Haskell N. A., 1962, Radiation patterns of surface waves from point source in multi-layered medium, *Bulletin of Sismological Society of America* , N°54, pp. 377-393.
- Hennino, R., Tregoures, N., Shapiro, N.M., Margerin, L., Campillo, M., Van Tiggelen B.A. and Weaver, R. L., 2001, Observation of equipartition of seismic waves, *Phys. Rev. Lett.*, 86, 3447–3450. doi: 279 10.1103/Phys Rev Lett. 86.3447.
- Instituto Geofísico del Perú (IGP), Perú. Página web: [www.igp.gob.pe](http://www.igp.gob.pe)
- Jaimes, M. A., Reinoso, E., and Ordaz, M., 2006, Comparasion of methods to predict response spectra at instrumented sites given the magnitude and distance of an earthquake, *Journal of Earthquake Engineering*, 10(6), 887-902.
- Joyner, W. B., and Boore, D. M., 1993, Methods for regression analysis of strong-motion data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(2), 469–487.
- Kanai, K and Tanaka (1954), “Measurement of the microtremor”, *Bull Earthquake Res Inst. Tokyo Univ.* 32, 199-209.
- Kawase, H., Sánchez-Sesma, F. J. and Matsushima, S., 2011, The optimal use of horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratios of earthquake motions for velocity structure inversions based on diffuse field theory for plane waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(5), 2001-2014, doi: 10.1785/0120100263.


- Kawase, H. Mori, Y. and Nagashima F., 2018, Difference of horizontal-to-vertical spectral ratios of observed earthquakes and microtremors and its application to S-wave velocity inversion based on the diffuse field concept, *Earth, Planets and Space*, 70, 32p, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0766-4>
- Lachet, C. and Bard, P. Y., 1994, Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *J. Phys. Earth.*, 42, 377-397.
- Le Roux, J., C. Tavares Correa & F. Alayza (2000). Sedimentology of the Rímac-Chillón alluvial fan at Lima, Peru, as related to Plio-Pleistocene sea-level changes, glacial cycles and tectonics. *Journal of South American Earth Sciences*, 13, 499-510.
- Lermo, J. and Chávez-García, F. J., 1993, Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 1574-1594.
- Lermo, J. and Chávez-García, F. J., 1994a, Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records, *Soil Dyn. & Earthq. Eng.*, 13, 413-423.
- Lermo, J. and Chávez-García, F. J., 1994b, Are microtremors useful in site response evaluation?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 1350-1364.
- Limaymanta-Mendoza, M. (2009). Uso de familias espectrales obtenidas con registros de sismos y microtremores para la clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico: aplicación en las ciudades de Veracruz-Boca del Río, Oaxaca y Acapulco. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez A. y Porturas F. (1975). Planos Geotécnicos para Lima - Perú. Análisis y Visión - Ingeniería Sísmica. Reunión Andina y Seguridad Sísmica. U.P.C.-C.I.D.A., publicación L.g.g.a N° 54 y 66.
- Martínez, J. (2014) Validación del factor de amplificación de los cocientes espectrales a partir de microtremores para fines de mapas sísmicos de intensidad. (Tesis de Maestría) Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Margerin, L., 2009, Generalized eigenfunctions of layered elastic media and application to diffuse fields, *J. Acoust. Soc. Am.*, 125, 164-174.
- Margerin, L., Campillo, M., Van Tiggelen, B. A., and Hennino, R., 2009, Energy partition of seismic coda waves in layered media: Theory and application to Pinyon Flats Observatory, *Geophys. J. Int.*, 177, 571-585.
- Martínez-González, J.A., Lermo J., Sánchez-Sesma, F.J., Angulo-Carrillo, J., Valle-Orozco, R., Ordoñez-Alfaro, J., Pérez-Rocha L.E., 2012, Effects of the subsidence on the changes of dominant periods of soils within Mexico City Valley. In: 15th World Conference on Earthquake Engineering id.3598.
- Martínez-González, J.A., Lermo J., Vergara-Huerta, F., Ramos-Pérez, E., 2015, Avances en la zonificación sísmica de la ciudad de México y zona de Chalco, Edo. de Mex., propuesta de nuevo mapa de periodos dominantes para las NTC para diseño por sismo del reglamento del D.F. In: XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.
- Montecillo T. R., 1996, Estimación empírica de efectos de sitio en el Distrito Federal, Tesis para obtener el título de Ingeniero Geofísico, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Municipalidad Distrital de la Molina 2011), Estudio de Microzonificación sísmica y Vulnerabilidad en el Distrito la Molina,
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on ground surface. Japón: Railway technical research institute.
- Nogoshi, M. & Igarashi T., 1971. On the amplitude characteristics of microtremor (part 2) (in Japanese with english abstract). *J. of seism. Soc. of Japan*, 24, 26-40.


- Norma Técnica, E. 030 “Diseño Sismorresistente” del RNE. Decreto supremo n003-2016-vivienda. Perú. DS-003-2016.Vivienda peruana., pp. 38.
- Norabuena, Edmundo, O., Timothy, H., Dixon, Seth Stein, A Christopher G. A. Harrison (1999), Decelerating Nazca-South America And Nazca-Pacific Plate Motions, *Geophysical Research Letters*, 26-22, 3405-3408.
- Quispe, S., Chimoto, K., Yamanaka, H., Tavera, H., Lazares, F., & Aguilar, Z. (2014). Estimation of S-Wave Velocity Profiles at Lima City, Peru Using Microtremor Arrays. *Journal of Disaster Research*, 9(6), 931-938.
- Reinoso, E., Ordaz, M.& Sanchez-Sesma, F.J. (1990). A note on the fast computation of response spectra estimates. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19 (7), 971-976.
- Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos (RENADIC), Chile: [www.terremotosuchile.cl](http://www.terremotosuchile.cl) [2010].
- Repetto, P., Arango, I. y Seed, H.B. (1980). Influence of site characteristics on building damage during the October 3, 1974 Lima Earthquake: Earthquake Engineering Research Center University of California-Berkeley, Report UCB/EERC-80/41, Berkeley, CA, 77 p.
- Ríos León, J. (2016) Mediciones de vibración ambiental para la caracterización de efectos de sitio – Aplicación campus PUCP. (Tesis de Licenciatura) Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Mención: Ingeniería Civil. Perú.
- San Bartolomé Ramos, Ángel Francisco (1979). *Apuntes sobre ingeniería sísmica: Dinámica de suelos*. PUCP.
- Sánchez-Sesma F.J., Weaver R.L., Kawase H., Matsushima S., Luzón F., and Campillo M., 2011a, Energy Partitions among elastic waves for dynamic surface loads in a semi-infinite solid, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(4), 1704-1709, doi: 10.1785/0120100196.
- Sánchez-Sesma, F. J., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, A., Suárez, M., Santoyo, M. A. & Rodríguez-Castellanos, A., 2011b, A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium, *Geophys. J. Int.*, 186, 221-225. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05064.
- SESAME. (2005). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation.
- Shapiro, N. M., and M. Campillo (2004), Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L07614.
- Sifuentes, A. I., 2012, Microzonificación geotécnica sísmica del distrito de La Molina, tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú, pp273.
- Trigo, T. (2007). Influencia de la amplificación local de las ondas sísmicas y la interacción suelo-fundación en el puente Marga-Marga. (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile, Chile.
- Weaver, R. L., 1982, On diffuse waves in solid media, *Journal of the Acoustic Society of America*, 71, 1608-1609.
- Weaver, R. L., 1985, Diffuse elastic waves at a free surface, *Journal of the Acoustic Society of America*, 78, 131-136.
- Weber, B., Schaaf, P., Valencia, V. A., Iriondo, A., and Ortega-Gutierrez, F., 2006, Provenance ages of late Paleozoic sandstones (Santa Rosa Formation) from the Maya Block, SE México: implications on the tectonic evolution of western Pangea, *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 23(3), 262-276.



## ANEXO A: FICHA DE ALGUNOS PUNTOS



<b>MICROZONIFICACION, CARACTERIZACION DE TERRENOS PARA DISEÑO SISMICO Y DETERMINACION DE MAPAS DE INTESIDADES SISMICAS EN EL DISTRITO DE LA MOLINA</b>			
<b>PUNTO:</b>	M-00	<b>FECHA:</b>	06/08/2019
<b>HORA INICIO:</b>	09:00	<b>HORA FIN:</b>	09:20
<b>LATITUD:</b>	-12.0795	<b>LONGITUD:</b>	-76.9515
<b>REFERENCIA:</b>	Puerta Universidad Agraria		





MICROZONIFICACION, CARACTERIZACION DE TERRENOS PARA DISEÑO SISMICO Y DETERMINACION DE MAPAS DE INTESIDADES SISMICAS EN EL DISTRITO DE LA MOLINA					
Punto		MA-1	Fecha		06/08/2019
Hora Inicio		09:30 a. m.	Hora Fin		09:50 a. m.
LATITUD	GD	-12.080857	Longitud	GD	-76.949669
	GMS	12°4'51" S		GMS	76°56'58" W
Referencia		Ubicado dentro de la UNALM, centro de cultivos.			
					

Punto		MA-2	Fecha		06/08/2019
Hora Inicio		09:57 a. m.	Hora Fin		10:17 a. m.
Latitud	GD	-12.081401	Longitud	GD	-76.947856
	GMS	12°4'53" S		GMS	76°56'52" W
Referencia		Frente a la escuela de Pos grado UNALM, costado del auditorio A-6 UNALM			
Observaciones		Flujo peatonal bajo			

Punto		MA-3	Fecha		06/08/2019
Hora Inicio		10:29 a. m.	Hora Fin		10:49 a. m.
Latitud	GD	-12.083861	Longitud	GD	-76.947755
	GMS	12°5'1" S		GMS	76°56'51" W
Referencia		Estacionamiento UNALM, altura de la Clínica de Diagnóstico de fitopatología y hematología UNALM y Capilla San Isidro Labrador			

Punto		MA-4	Fecha		06/08/2019
Hora Inicio		11:15 a. m.	Hora Fin		11:35 a. m.
Latitud	GD	-12.084956	Longitud	GD	-76.957039
	GMS	12°5'5" S		GMS	76°57'25" W
Referencia		Av. Del Corregidor /Parque Infantil "Barbara D' Achille"			
Observaciones		Solo flujo peatonal			



Punto		MA-5	Fecha		06/08/2019
Hora Inicio		11:54 a. m.	Hora Fin		12:14 p. m.
Latitud	GD	-12.087655	Longitud	GD	-76.958863
	GMS	12°5'15" S		GMS	76°57'31" w
Referencia		Calle los Crisantemos			



Punto		MA-6	Fecha		08/08/2019
Hora Inicio		12:32 p. m.	Hora Fin		12:52 p. m.
Latitud	GD	-12.105273	Longitud	GD	-76.942298
	GMS	12°6'18" S		GMS	76°58'32" W
Referencia		Plaza Biblioteca La Molina Sur			





Punto		MA-7	Fecha		08/08/2019
Hora Inicio		01:05 p. m.	Hora Fin		01:25 p. m.
Latitud	GD	-12.097181	Longitud	GD	76.950195
	GMS	12°5'49" S		GMS	76°57'0"W
Referencia		Afuera de la Universidad San Martin de Porres, Facultad de Medicina			
Observaciones		Paso de 2 autos durante la toma de datos			



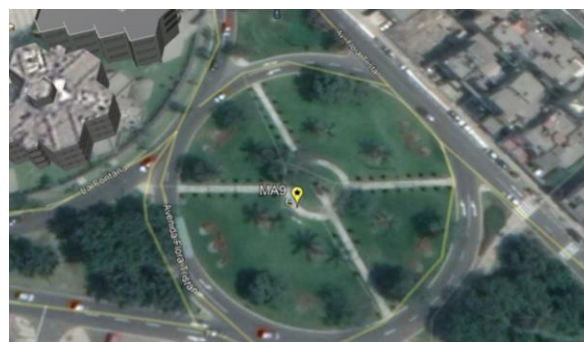
Punto	MA-8		Fecha		08/08/2019
Hora Inicio	01:38 p. m.		Hora Fin		01:58 p. m.
Latitud	GD	-12.088866	Longitud	GD	-76.951638
	GMS	12°5'19" S		GMS	76°57'5"W
Referencia	Calle Las Begonias -Sobre el Jardín				



Punto		MA-9	Fecha		06/08/2019
Hora Inicio		02:48 p. m.	Hora Fin		03:08 p. m.
Latitud	GD	-12.072521	Longitud	GD	-76.941
	GMS	12°4'21" S		GMS	76°56'27" W
Referencia		Óvalo del Parque Cáceres			

Flujo de vehículos moderado-alto

Observaciones



Punto		MA-10	Fecha		06/08/2019
Hora Inicio		03:20 p. m.	Hora Fin		03:40 p. m.
Latitud	GD	-12.0752	Longitud	GD	-76.9394
	GMS	12°4'30.72" S		GMS	76°56'21.84" W
Referencias		Altura de Av. Flora Tristán			
Observaciones		Flujo vehicular: Autos, Camiones hasta 3 ejes			



Punto		MA-11	Fecha		06/08/2019
Hora Inicio		03:50 p. m.	Hora Fin		04:10 p. m.
Latitud	GD	-12.0755343	Longitud	GD	-76.9367401
	GMS	12°4'31.92" S		GMS	76°56'12.24" W
Referencias		Altura del mall, esquina Grifo Petro Perú			
Observaciones		Sentido de vía ambos, tránsito vehicular moderado			



Punto		MA-12	Fecha		06/08/2019
Hora Inicio		04:30 p. m.	Hora Fin		04:36 p. m.
Latitud	GD	-12.0870399	Longitud	GD	-76.9338772
	GMS	12°5'13.34" S		GMS	76°56'1.96" W
Referencias		Cementerio			



Punto		MA-13	Fecha		06/08/2019
Hora Inicio		04:52 p. m.	Hora Fin		05:12 p. m.
Latitud	GD	-12.0784996	Longitud	GD	-76.9471858
	GMS	12°4'42.599" S		GMS	76°56'49.868" W
Referencias		Puerta N° 1 UNALM-(BCP)			
Observaciones		Tránsito normal, autos buses,			



E



Punto		MA-14	Fecha		06/08/2019
Hora Inicio		05:30 p. m.	Hora Fin		05:50 p. m.
Latitud	GD	-12.0757952	Longitud	GD	-76.9560855
	GMS	12°4'32.86" S		GMS	76°57'21.91" W
Referencias		Av. Manzanos S/N			
Observaciones		Viviendas de hasta 2 pisos			



## ANEXO B

MICROZONIFICACION, CARACTERIZACION DE TERRENOS PARA DISEÑO SISMICO Y DETERMINACION DE MAPAS DE INTESIDADES SISMICAS EN EL DISTRITO DE LA MOLINA			
PUNTO:	MB-01	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	10:00	HORA FIN:	10:15
LATITUD:	-12.0815	LONGITUD:	-76.8918
REFERENCIA:	Calle Acapulco/ Punta pejerrey		



PUNTO:	MB-02	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	10:24	HORA FIN:	10:44
LATITUD:	-12.0839	LONGITUD:	-76.8963
REFERENCIA:	Calle Bahamas/ Naplo		



PUNTO:	MB-03	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	10:53	HORA FIN:	11:13
LATITUD:	-12.0837	LONGITUD:	-76.9016
REFERENCIA:	Jr. Paracas/ La molina sport		



PUNTO:	MB-04	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	11:34	HORA FIN:	11:54
LATITUD:	-12.0833	LONGITUD:	-76.9096
REFERENCIA:	Calle lido 285		



PUNTO:	MB-05	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	12:01	HORA FIN:	12:21
LATITUD:	-12.0868	LONGITUD:	-76.9140
REFERENCIA:	Paradero paraíso		





PUNTO:	MB-06	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	12:27	HORA FIN:	12:47
LATITUD:	-12.0840	LONGITUD:	-76.9151
REFERENCIA:	Jr Chalana/Sotavento 488		



PUNTO:	MB-07	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	12:57	HORA FIN:	13:17
LATITUD:	-12.0831	LONGITUD:	-76.9144
REFERENCIA:	Calle timonel		



PUNTO:	MB-08	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	13:29	HORA FIN:	13:49
LATITUD:	-12.0793	LONGITUD:	-76.9133
REFERENCIA:	José León Barandiarán 790 (Cerca est RIN)		



PUNTO:	MB-09	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	13:59	HORA FIN:	14:21
LATITUD:	-12.0742	LONGITUD:	-76.9136
REFERENCIA:	José León Barandiarán 176		





PUNTO:	MB-10	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	15:40	HORA FIN:	16:00
LATITUD:	-12.0753	LONGITUD:	-76.9358
REFERENCIA:	Av. Melgarejo/Av. La molina grifo Primax		



PUNTO:	MB-11	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	16:23	HORA FIN:	16:43
LATITUD:	-12.0829	LONGITUD:	-76.9293
REFERENCIA:	Tottus		





PUNTO:	MB-12	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	17:00	HORA FIN:	17:20
LATITUD:	-12.0874	LONGITUD:	-76.9251
REFERENCIA:	Av. Rinconada del lago (Caseta de serenazgo)		



PUNTO:	MB-13	FECHA:	06/08/2019
HORA INICIO:	17:33	HORA FIN:	17:53
LATITUD:	-12.093	LONGITUD:	-76.926
REFERENCIA:	Av. Rinconada del lago 682		

