



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



ESTUDIO GEOFÍSICO – GEOTÉCNICO DE LOS SUELOS EN CENTROS POBLADOS DE LA REGIÓN PIURA Y SU APORTE A LA GRD C. P. MONTE LIMA

Informe Técnico N°010-2024/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Enero, 2024

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Director Ciencias de la Tierra Sólida: Juan Carlos Gómez

Informe Técnico

Estudio geofísico – geotécnico de los suelos en centros poblados de la Región Piura y su aporte a la gestión del riesgo de desastres – C.P. Monte Lima.

Autores

Isabel Bernal, Luz Arredondo, Hernando Tavera, Juan Carlos Gómez

Participantes:

Evaluación Geofísica: Fabiola Rosado / Isabel Bernal / Kelly Pari / Wilfredo Sulla / Liliana Torres / Luz Arredondo/ Jorge Salas.

Cartografía: Javier Oyola.

Evaluación Geodinámica-Geotécnica: Roberth Carrillo/ Segundo Ortiz/ Juan Carlos Gómez/ Juan Carlos Villegas /Keiko Morocchoire / Oscar Balladares.

Apoyo técnico: Jesús Huarachi.

Apoyo logístico: Robert Yupanqui / Augusto Cárdenas.

Apoyo administrativo: Marisol Enríquez / Susana Huaccachi

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
Teléfono: 51-1-3172300

**ESTUDIO GEOFÍSICO – GEOTÉCNICO DE LOS SUELOS EN CENTROS
POBLADOS DE LA REGIÓN PIURA Y SU APOORTE A LA GESTIÓN DEL
RIESGO DE DESASTRES**

– C. P. MONTE LIMA –

Lima – Perú
Enero, 2024

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS

1.2. ÁREA DE ESTUDIO

1.3. MARCO TEÓRICO

2.- GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y GEOTÉCNIA

2.1. GEOLOGÍA LOCAL

2.2. GEOMORFOLOGÍA

2.2.1. Levantamiento topográfico - fotogrametría

2.2.2. Unidades geomorfológicas

2.3. GEODINÁMICA

2.4. GEOTÉCNIA

3.- EVALUACIÓN GEOFÍSICA

3.1. METODOLOGÍA

3.1.1. Razones espectrales (H/V)

3.1.2. Ondas superficiales y microtemores

3.1.3. Tomografía de resistividad eléctrica

3.2. ADQUISICIÓN DE DATOS

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Frecuencias predominantes

3.3.2. Perfiles sísmicos

3.3.3. Secciones geoelectricas

3.4. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS

4. ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA-GEOTÉCNICA

CONCLUSIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

ANEXO 1: Información topográfica

Ortomosaico

Curvas de nivel

ANEXO 2: Información geofísica

Perfiles sísmicos

Secciones geoelectricas

RESUMEN

En este estudio se analiza y evalúa las características físicas y dinámicas de los suelos del Centro Poblado Monte Lima – Región Piura, a partir de la aplicación de técnicas geofísicas y geotécnicas. Los resultados obtenidos evidencian la presencia de suelos medianamente rígidos a rígidos (suelos aluviales con velocidades V_{s30} : 283-369 m/s) formando capas con espesores de 28 metros en dirección oeste y norte (sector 03 de mayo y Calle Sánchez Cerro) y de 37 metros en dirección este y sur (calles Panamericana y Las Mercedes), los cuales responde a periodos cortos de vibración (0.1 – 0.3 segundo) y presentan capacidad de carga admisible Muy Baja ($<1.0 \text{ Kg/cm}^2$), a profundidades de 1.0 y 1.5 metros. De acuerdo con estas características en Monte Lima predominan Suelos Tipo S2 y S3 que corresponden a suelos rígidos e intermedios, con la presencia de una capa delgada de suelos blandos a nivel superficial (Norma E.030– adaptada para el área de estudio). Estos suelos, presentan alto contenido de humedad, en dirección sur y este de la Plaza de Armas, hasta una profundidad promedio de 40 metros los que se relacionan a la proximidad a canales, zonas de inundación y zonas agrícolas. A la ocurrencia de un sismo de moderada a mayor magnitud, estos suelos pueden experimentar niveles altos de sacudimiento, por la presencia de suelos blandos con altos niveles de humedad a nivel superficial.

1. INTRODUCCIÓN

Por su ubicación geográfica, el Perú es un país altamente sísmico debido a que en su borde occidental se desarrolla el proceso de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana a velocidades del orden de 6-8 cm/año (Norabuena et al, 1999; Villegas et al, 2016). En este contexto, la región norte ha sido afectada por eventos sísmicos de variada magnitud que han generado altos niveles de sacudimiento del suelo, puesta en evidencia con los daños observados post-sismo (Silgado, 1978; Tavera et al. 2016). Al ser los sismos cíclicos, es de esperarse que, en el futuro, las mismas ciudades y/o áreas urbanas sean afectadas por nuevos eventos sísmicos con la misma o mayor intensidad, tal como ocurrió en la provincia de Sullana el 30 de julio del 2021 con un sismo de magnitud M6.1 (IGP, 2021) que sacudió los suelos en un radio de 250 km tomando como referencia el epicentro del sismo.

Después de ocurrido el sismo de Sullana, la evaluación de los daños fue mayor en las ciudades y localidades de Piura, Sullana, Paita, Chulucanas y Colán, debido principalmente a la presencia de suelos blandos y/o con efectos de sitio, llegando a corroborar que las características físicas del subsuelo influyen directamente en el comportamiento dinámico del suelo sobre el cual se levantan las ciudades y/o futuras áreas de expansión. En este sentido, resulta de vital importancia conocer la composición geológica de los suelos y su comportamiento dinámico a la ocurrencia de sismos y ello, es posible con la aplicación de métodos geofísicos. Estos métodos permiten conocer por ejemplo, el contenido de humedad, espesores y velocidades de las ondas de corte (V_s) en las capas que conforman su subsuelo y a su vez, los resultados obtenidos pueden ser correlacionados con los aspectos geo-ambientales de la zona de estudio. El suelo acondiciona el diseño y la construcción de viviendas y estructuras apropiadas para cada tipo de suelo.

En este contexto, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y la Región Piura, mediante la firma de un convenio acuerdan realizar el estudio Geofísico-Geotécnico de los suelos en el centro poblado Monte Lima (provincia de Sullana, región Piura) y cuyos resultados contribuirán a la Gestión del Riesgo de Desastres ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud y sus efectos asociados.

1.1. OBJETIVOS

El presente estudio tiene como objetivo conocer los parámetros físicos de la estructura del suelo y su comportamiento dinámico ante la ocurrencia de sismos a fin de generar el Mapa de Zonificación Geofísica – Geotécnica para el C.P. Monte Lima, ubicado en el distrito Ignacio Escudero, provincia de Sullana en la región Piura. Mediante el uso de diferentes métodos geofísicos, geológicos y geotécnicos que en conjunto, permitirán determinar los diferentes parámetros físicos y dinámicos del suelo (velocidades, espesores, resistividad, periodos de respuesta, amplificaciones, capacidad portante y otros). Los resultados de este estudio deben ser considerados por las autoridades locales como insumo para la gestión del riesgo de desastres, a fin de realizar una adecuada planificación territorial y expansión urbana.

1.2. ÁREA DE ESTUDIO

El centro poblado Monte Lima se ubica en el distrito de Ignacio Escudero, provincia de Sullana en el departamento de Piura (Figura 1), entre las coordenadas geográficas latitud 4.86°S y longitud 80.94°O, a una elevación media de 26 m.s.n.m. Asimismo, tiene una población de más de 1905 habitantes (INEI, 2017). y su superficie se caracteriza por presentar un relieve llano. Los fenómenos naturales que afectan directamente a esta población, son los sismos y las intensas precipitaciones que pueden generar altos niveles de sacudimiento del suelo e inundaciones, que causaran daños a la población.

1.3. MARCO TEÓRICO

• Zonificación, Norma Técnica E.030

En el Perú, la construcción de obras civiles de cualquier envergadura debe considerar lo establecido por la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones, modificada según Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda y actualizada según Resolución Ministerial N° 355-2018-Vivienda. Básicamente, esta norma considera los perfiles de suelos en función de sus propiedades físicas, tomando en cuenta la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte,

o alternativamente estudios de mecánica de suelos (EMS). A continuación, se describen los parámetros empleados para clasificar los perfiles de suelos en la Tabla 1.

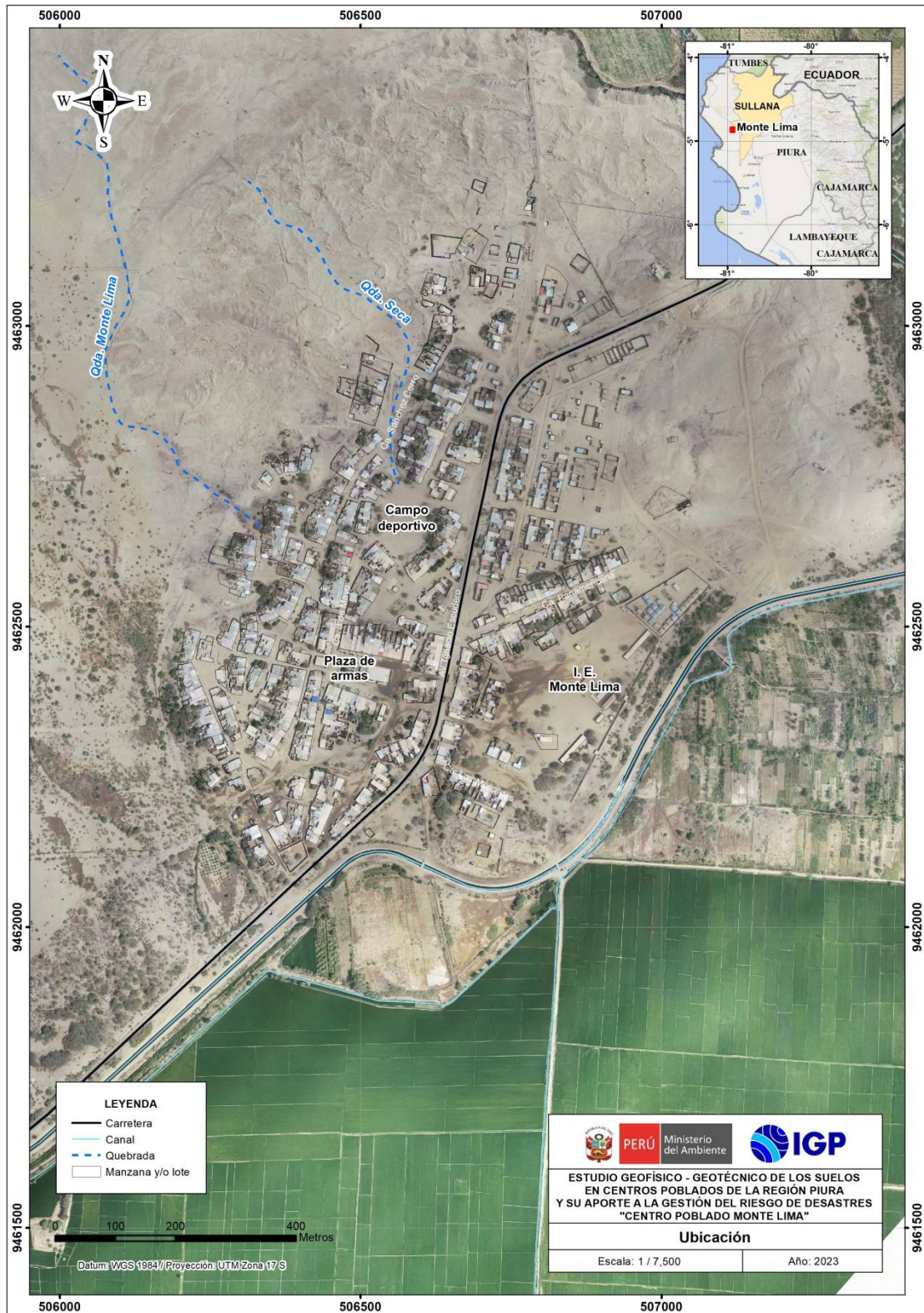









Figura 1. Centro poblado Monte Lima.

Tabla 1. Clasificación de los perfiles de suelos considerando lo establecido en la Norma Técnica E.030 (2018) y su adaptación al área de estudio.

NORMA E.030 (2018)			ADAPTACIÓN DE LA NORMA E.030 AL ÁREA DE ESTUDIO				
Perfil	Velocidad - Vs30 -	Tipos de suelos	Perfil	Velocidad- Vs30 -	Periodos To (s)	Tipos de suelos	Zonas
S0	>1500 m/s	Roca dura	S0	>1500 m/s	-	Roca dura	— 
S1	500 a 1500 m/s	Suelos muy rígidos	S1	500 a 1500 m/s	0.1-0.2	Suelos muy rígidos	Zona I 
S2	180 a 500 m/s	Suelos intermedios	S2	350 a 500 m/s	0.2-0.4	Suelos rígidos	Zona II 
			S3	180 a 350 m/s	0.5-0.7	Suelos intermedios - (medianamente rígidos)	Zona III 
S3	<180	Suelos blandos	S4	<180 m/s	>0.7	Suelos blandos	Zona IV 
S4	Condición basada en EMS	Condiciones Excepcionales	S5	Condición basada en EMS		Suelos inestables por su composición	Zona V 
						Suelos inestables por topografía	
Zonas con factor de amplificación relativa ≥ 2.5 veces							

La velocidad de propagación de ondas de corte para los primeros 30 metros (Vs30) se determina con la siguiente fórmula:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{V_{si}}\right)}$$

Dónde:

di = espesor de cada uno de los estratos n.

Vsi = velocidad de ondas de corte (m/s).

Para este estudio, la Zonificación Geofísica - Geotécnica de las ciudades se realiza en función de las características mecánicas, físicas y dinámicas de los suelos que conforman el terreno de cimentación del área de estudio y de las consideraciones dadas por la Norma E.030. De acuerdo a los estudios realizados por el Instituto Geofísico del

Perú (IGP), el rango de velocidad de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen, a fin de analizar con mayor detalle las velocidades de ondas de corte que caracterizan a los suelos identificados en la zona de estudio, en ese sentido se establece la existencia de 5 zonas cuyas características se muestran en la Tabla 1

- **Antecedentes**

La información más relevante para conocer los fenómenos naturales de mayor recurrencia y sus efectos asociados en la región Piura y en el C.P. Monte Lima, fue consultada de las siguientes fuentes:

Alfaro et al. (2014): Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). El estudio detalla el cálculo de umbrales de precipitación usando datos de la red de estaciones meteorológicas del SENAMHI para el periodo 1964 – 2014 y de la estación meteorológica Mallares que se ubica a 22.80 km al suroeste del área de estudio. De acuerdo con los datos meteorológicos de dicha estación, las precipitaciones en el área de estudio se presentan entre el periodo diciembre – abril, siendo el registro histórico máximo de precipitaciones el día 22 de marzo de 1998 con valores de 201.00 mm/día.

Laboratorio de mecánica de suelos del Gobierno Regional de Piura (2022): El estudio de mecánica de suelos se realizó con fines de cimentación para el proyecto: "Elaboración de los estudios de evaluación de riesgo de desastres - EVAR para la formulación del plan regional integral de reconstrucción ante el sismo de 30 de julio del 2021".

Según el estudio, se han realizado cinco (5) calicatas en el área urbana del C.P de Monte Lima con profundidades máximas de 3.0 metros; posteriormente se realizaron ensayos de mecánica de suelos (contenido de humedad del suelo, análisis granulométrico, límites líquido y plástico, proctor modificado, corte directo y sales solubles totales) y cuyos resultados han permitido identificar, según la clasificación SUCS, que en el área urbana del C.P. Monte Lima, los suelos están compuestos por limos de baja plasticidad, arena limosa y arena arcillosa. Asimismo, los parámetros geotécnicos obtenidos mediante el ensayo de corte directo, indican que el ángulo de

fricción de los suelos presenta valores entre 13° y 18° , así como cohesión de 0.02 a 0.09. Según el estudio geotécnico, la capacidad portante en el C.P. Monte Lima presenta capacidad de carga admisible muy baja $< 1.00 \text{ kg/cm}^2$.

2. GEOLÓGIA, GEOMORFOLÓGIA Y GEOTÉCNIA

2.1. GEOLOGÍA LOCAL

El análisis de la geología regional ha sido desarrollado en base a información consolidada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 1999) a escala 100,000 (Cuadrángulo Geológico de Sullana – hoja 10-b); mientras que, para la geología local se ha hecho uso de información recolectada directamente en campo para el presente estudio. De acuerdo a estos resultados, se ha logrado identificar las siguientes unidades geológicas:

Depósito aluvial 2 (Q-al 2): Unidad geológica reciente (Holoceno), que se encuentra conformada por materiales heterogéneos como gravas, arenas y limos que fueron transportados por flujos de agua a través de quebradas y torrenteras hasta ser depositados en zonas de baja pendiente. Sobre esta unidad se practica la actividad agrícola del C.P. de Monte Lima.

Depósito aluvial 1 (Q-al 1): Están conformados por materiales heterogéneos de origen aluvial antiguo (Pleistoceno). Sobre esta unidad geológica se asienta el área urbana del C.P. de Monte Lima, (Figura 2).



Figura 2. Sobre estos depósitos aluviales antiguos se encuentra asentada parte del área urbana del centro poblado de Monte Lima.

Formación Chira (Te-ch): Están constituidas por conglomerados con areniscas arcóscicas de grano fino y color amarillo, son poco compactas y deleznales, debido a ello son susceptibles a la erosión. Sobre esta unidad se asienta el área urbana del centro poblado Monte Lima (Figura 3).



Figura 3. Parte del centro poblado de Monte Lima se asienta sobre la Formación Chira.

Las unidades geológicas antes descritas han sido cartografiadas en campo y representadas en el mapa geológico de la Figura 4.

2.2. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología estudia las diferentes formas del relieve de la superficie terrestre (geoformas) y los procesos que las generan. A continuación, se presenta el levantamiento topográfico del área de estudio identificando las elevaciones y pendiente del terreno y se describe las unidades geomorfológicas identificadas en el área urbana del C.P. Monte Lima en base a sus características físicas y los procesos que las han originado.

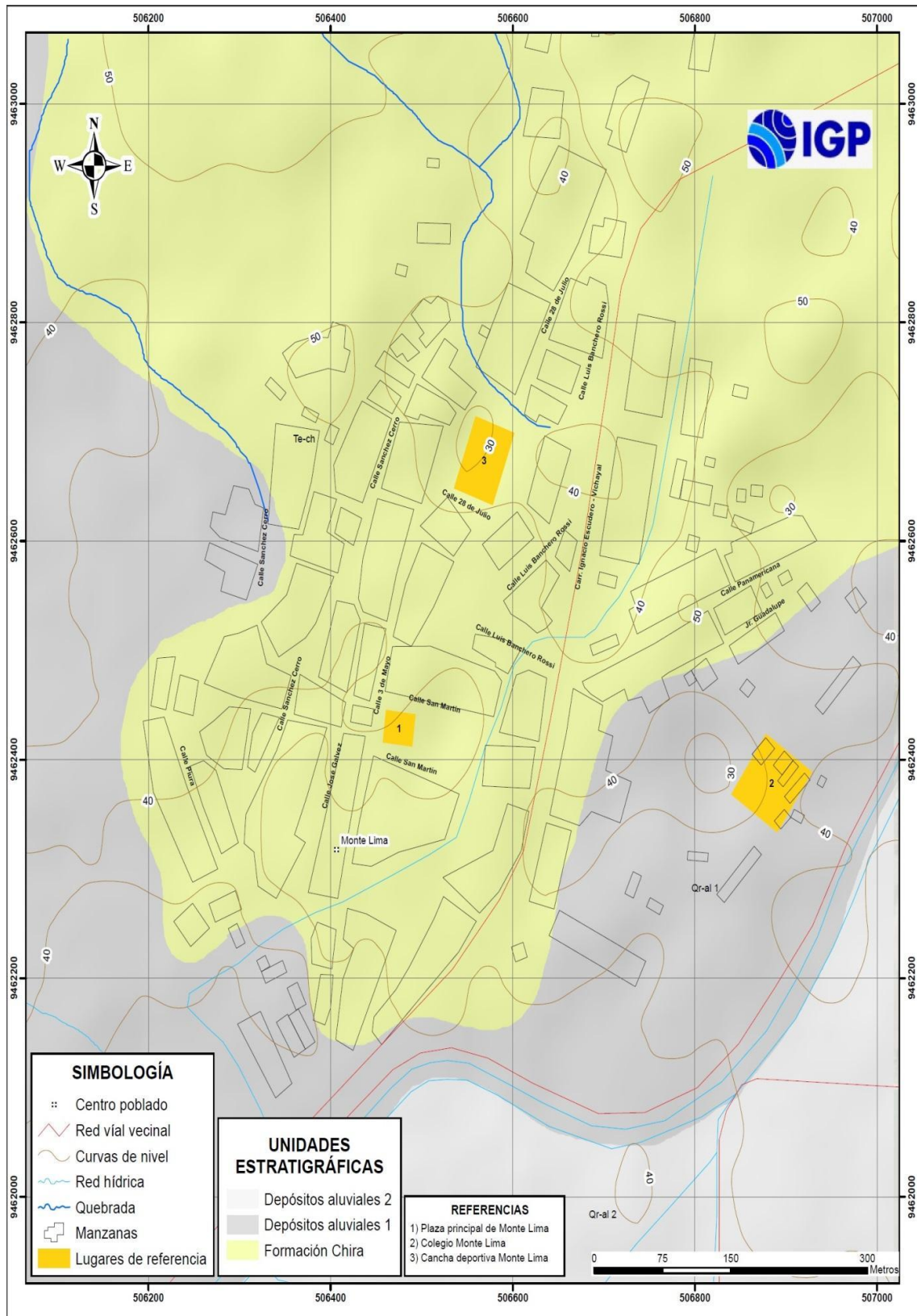


Figura 4. Mapa geológico del área urbana del centro poblado Monte Lima.

2.2.1. Levantamiento topográfico - fotogrametría

Se realizó el levantamiento topográfico en alta resolución del centro poblado de Monte Lima, mediante fotogrametría aérea con un dron modelo Phantom 4 Pro V2.0 y mediciones GNSS (sistema global de navegación por satélites), lo cual ha permitido generar lo siguiente:

- Modelo digital de superficie (MDS) y de terreno (MDT): Ambos con una resolución espacial de 30 cm/píxel, los cuales indican que el área de mayor elevación (30 a 96 m.s.n.m.) se encuentra en la zona oeste, mientras que la zona de menor elevación (15 a 22 m.s.n.m.) se distribuye al centro y sur abarcando el centro poblado y las áreas de cultivo (Figura 5).
- Ortomosaico: Se ha generado a partir de la unión de 1210 mosaicos que han sido corregidos por distorsiones ocasionados por el relieve y los objetos presentes en Monte Lima. La imagen permite identificar las áreas de cultivo que abarcan un área aproximada de 311 ha, el casco urbano 90 ha, estas zonas representan el 38% y 11% del área total respectivamente.
- Mapa de curvas de nivel: A partir del Modelo Digital del Terreno, se ha generado un mapa de curvas de nivel para el C.P. Monte Lima con un intervalo de 5 metros a escala 1:5000. Los resultados muestran elevaciones medias a bajas en la zona centro sur comprendiendo el casco urbano de Monte Lima y áreas de cultivo.

En el Anexo 1, se presenta el mapa de ortomosaico y de curvas de nivel con intervalos de 2 metros, para el C.P. Monte Lima.

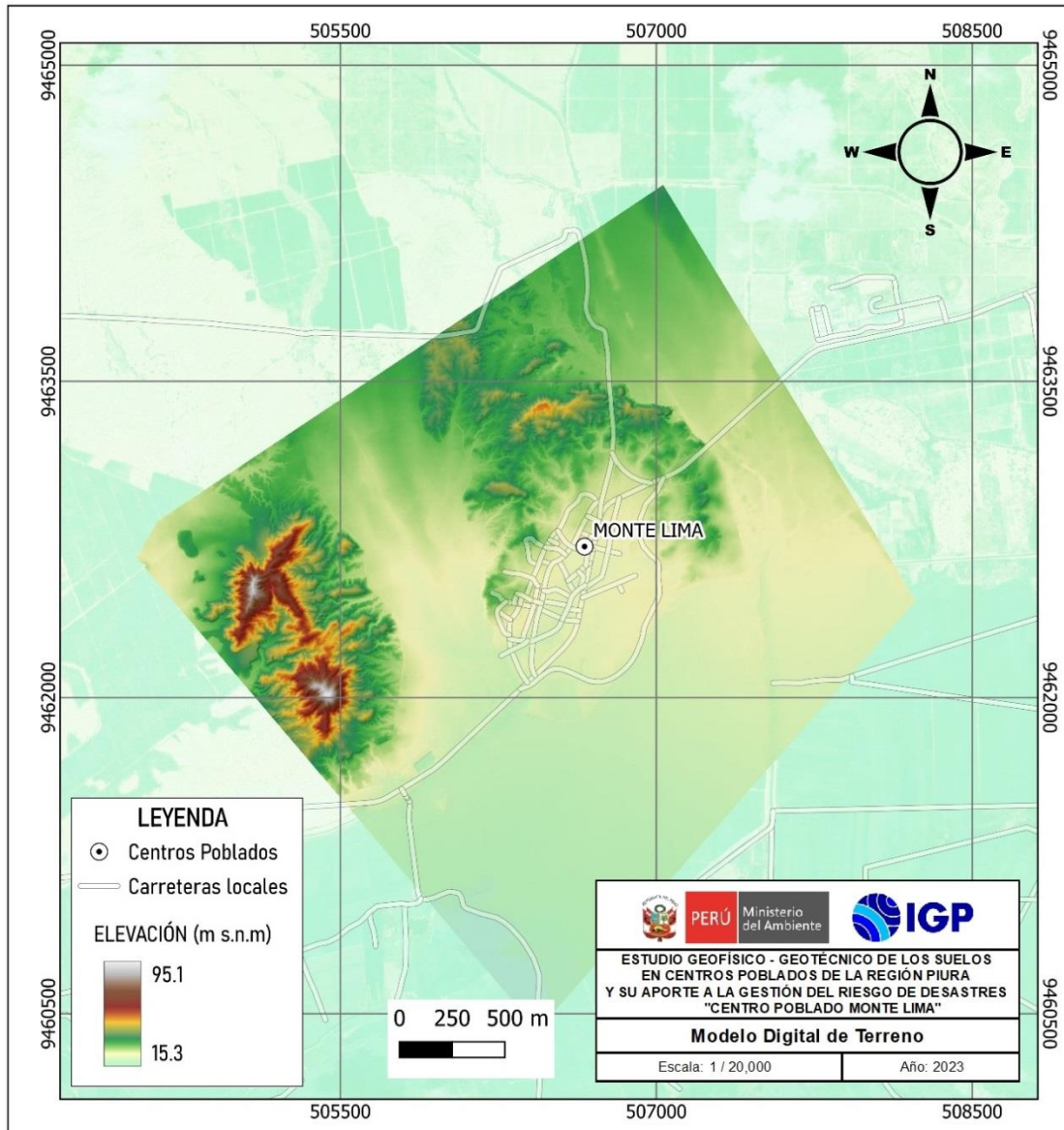


Figura 5. Modelo digital de terreno del C.P. Monte Lima.

2.2.2. Unidades geomorfológicas

Las principales unidades geomorfológicas identificadas en Monte Lima en base a sus características físicas y los procesos que las han originado son las siguientes:

Lomada: Se refiere a superficies elevadas de forma alargada con pendientes inferiores a 35° de inclinación. Esta unidad geomorfológica es de origen estructural y drenaje variable. Esta geoforma se sitúa a 120 m al noroeste y 410 m al noreste de la plaza principal del C.P. Monte Lima (Figura 6).

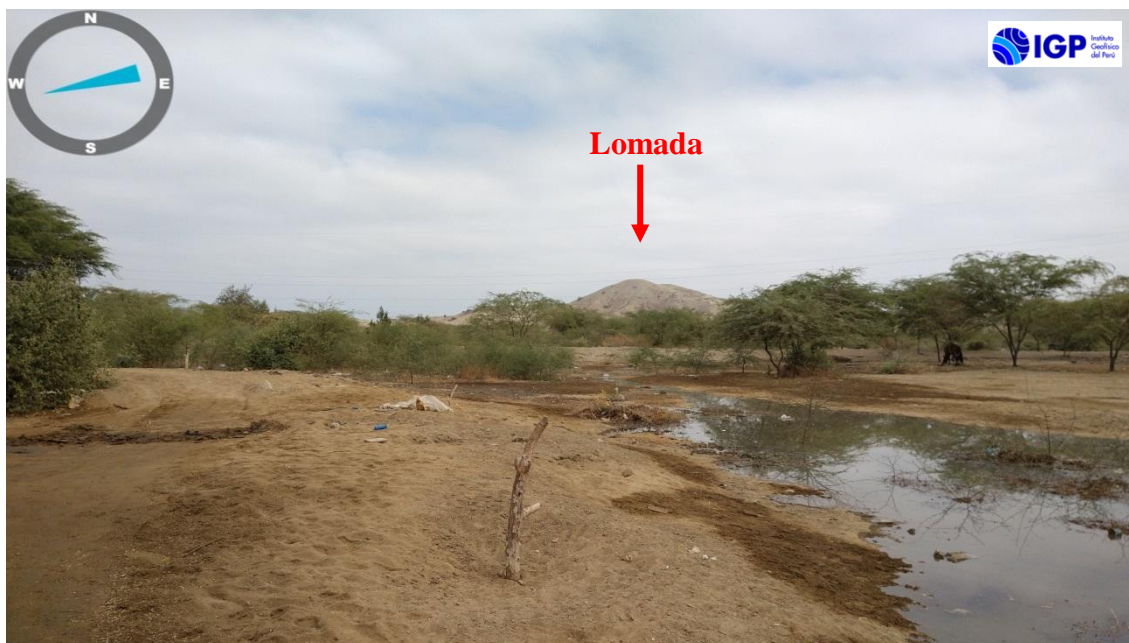


Figura 6. Lomada que se ubica a 120 m al noroeste y 410 m al noroeste de la plaza principal del C.P. Monte Lima.

Llanura aluvial: Se define como una superficie llana o ligeramente ondulada con pendientes menores a 10° de inclinación. Se encuentra conformada por materiales heterogéneos de origen aluvial (clastos subangulosos a subredondeados envueltos en matriz areno-limosa). Sobre esta unidad se asienta el área urbana del C.P. Monte Lima (Figura 7).



Figura 7. Sobre esta llanura aluvial se asienta el área urbana del C.P. Monte Lima.

Terraza aluvial 1: Las terrazas aluviales son plataformas, más o menos extensas y continuas que tienen un desnivel de entre 2 a 5 metros con respecto a la llanura aluvial. Esta unidad geomorfológica es de origen depositacional, presenta una pendiente $< 10^\circ$, así como una geometría irregular y drenaje variable. Sobre esta unidad se practica la actividad agrícola (Figura 8).



Figura 8.- Límite (línea roja) entre la terraza aluvial 1 y la llanura aluvial y sobre la última geoforma se asienta al área urbana del C.P. Monte Lima

Depresión: Formada por la acción hídrica en los suelos, es decir la energía de flujo manifestada en el arranque y desgaste del material que conforma el suelo. En el C.P. Monte Lima se han identificado 4 depresiones que funcionan como cuencas ciegas, en la cual se acumulan las aguas pluviales, (Figura 9).

Colina: Se refiere a superficies elevadas cuya base presenta forma redondeada, presenta pendientes menores a 20° de inclinación. Se sitúa a 250 m al noreste de la plaza principal del C.P. de Monte Lima (Figura 10).

Finalmente, en la Figura 11 se presenta el mapa de geomorfología del área urbana del C.P. Monte Lima, elaborado con la información recolectada en campo.



Figura 9.- En el C.P. Monte Lima se han identificado 4 depresiones que funcionan como cuencas ciegas, zonas donde se acumulan aguas de las precipitaciones pluviales.



Figura 10.- Colina situada a 250 m al noreste de la plaza principal del C.P. Monte Lima (flecha roja).

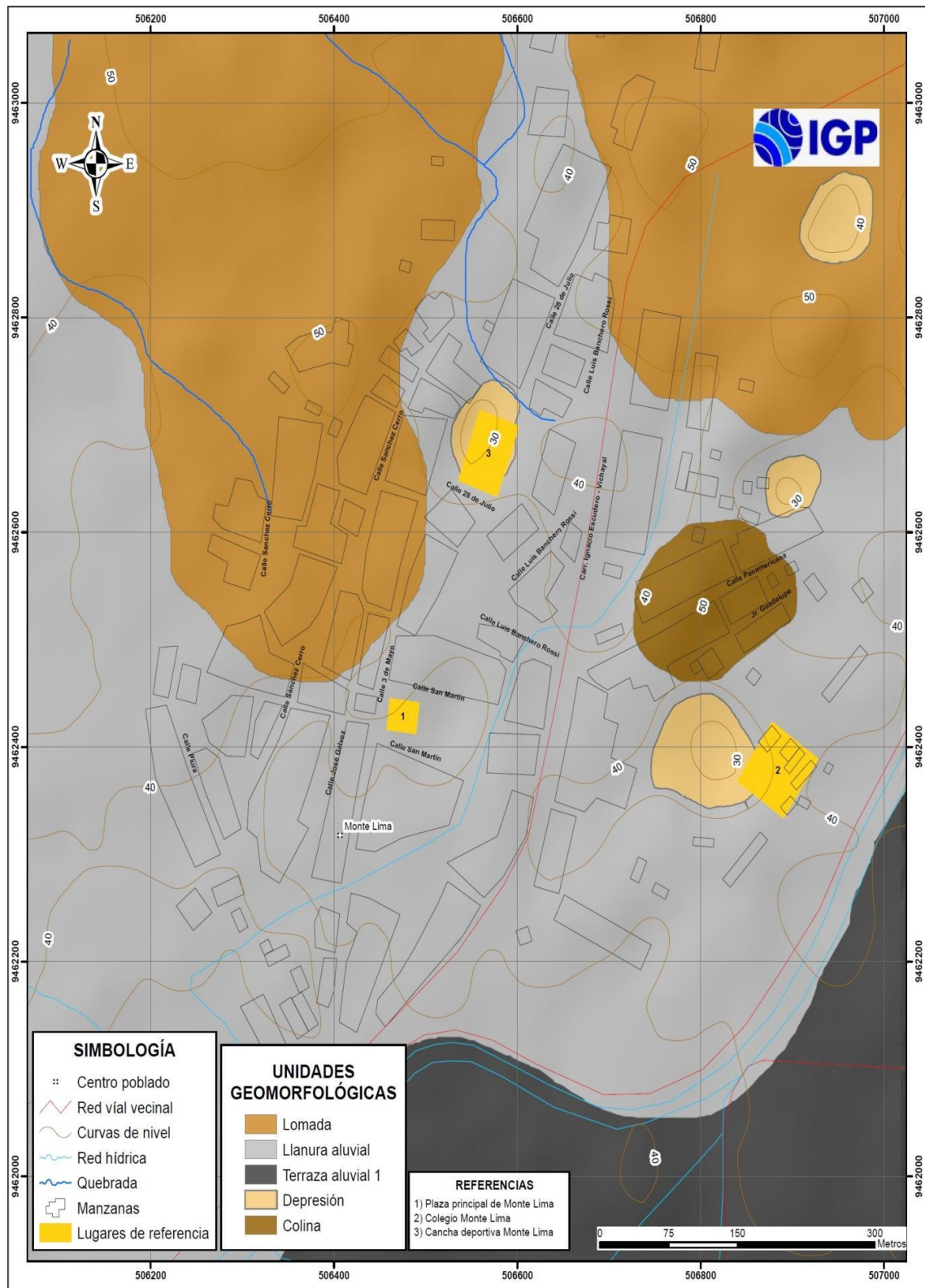


Figura 11. Mapa geomorfológico del área urbana del centro poblado de Monte Lima, donde la población se asienta principalmente sobre la llanura aluvial.

2.3. GEODINÁMICA

La Geodinámica estudia los fenómenos geológicos que provocan modificaciones en la superficie terrestre producto de la interacción de procesos geológicos (internos y externos) que originan cambios físicos, químicos y/o morfológicos que alteran y modifican el relieve actual. Durante los trabajos de campo, en el área urbana del C.P. de Monte Lima, se identificaron los siguientes eventos geodinámicos:

Inundación pluvial: Evento geodinámico que resulta de la acumulación de las aguas provenientes de las precipitaciones pluviales en las partes bajas o de menor pendiente (depresiones). En general, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días. Las zonas fueron identificadas y delimitadas con ayuda de la coordinadora de Defensa Civil y pobladores de la zona, los mismos que fueron reconocidos en las inmediaciones de la I.E. Monte Lima, cancha deportiva Monte Lima, quebrada seca que desembocan hasta la calle 28 de julio y quebrada Monte Lima que desemboca en la calle Sánchez Cerro, debido a la acumulación y evacuación de las aguas en la parte baja de los techos de las viviendas, ya que no cuentan con un sistema de drenaje perimetral y evacua las aguas hacía la calle, pudiendo afectar a las viviendas aledañas, cancha deportiva, I.E Monte Lima, Losa deportiva y las calles del centro poblado en mención, (Figuras 12, 13, 14 y 15).



Figura 12. Áreas afectadas (polígono celeste) por inundaciones pluviales (escorrentías superficiales) en épocas de precipitaciones intensas, las flechas indican la dirección del flujo



Figura 13. Área afectada por inundaciones pluviales en las inmediaciones de la losa deportiva del centro poblado de Monte Lima, la dirección del flujo (flechas celestes) va hacia suroeste del área urbana de Monte Lima.



Figura 14. Zona de confluencia de escorrentías superficiales, generándose inundaciones pluviales que afectan las viviendas aledañas



Figura 15. Áreas afectadas (polígono celeste) por inundaciones pluviales situadas en zonas con depresiones topográficas, afectando las viviendas aledañas a la zona de acumulación

Finalmente, se cartografía y genera el mapa geodinámico para el área urbana del centro poblado Monte Lima (Figura 16).

2.4. GEOTECNIA

Con la finalidad de obtener la información geotécnica de los suelos de cimentación en el área urbana del C.P. de Monte Lima, en coordinación con el Gobierno Regional de Piura, se ejecutaron exploraciones a cielo abierto (calicatas), análisis químico y cortes directos para la estimación de la capacidad de carga de los suelos.

Exploraciones a cielo abierto (calicatas, norma ASTM 420): Es un método de exploración directa que consiste en realizar una excavación en el terreno para la observación directa del suelo. En el área de estudio se realizaron cinco calicatas con profundidades de exploración de 3.0 metros, para describir los estratos que la conforman, así como extraer muestras en bolsas herméticas con capacidad de 5 kg. La ubicación de las calicatas se muestra en la Tabla 2.

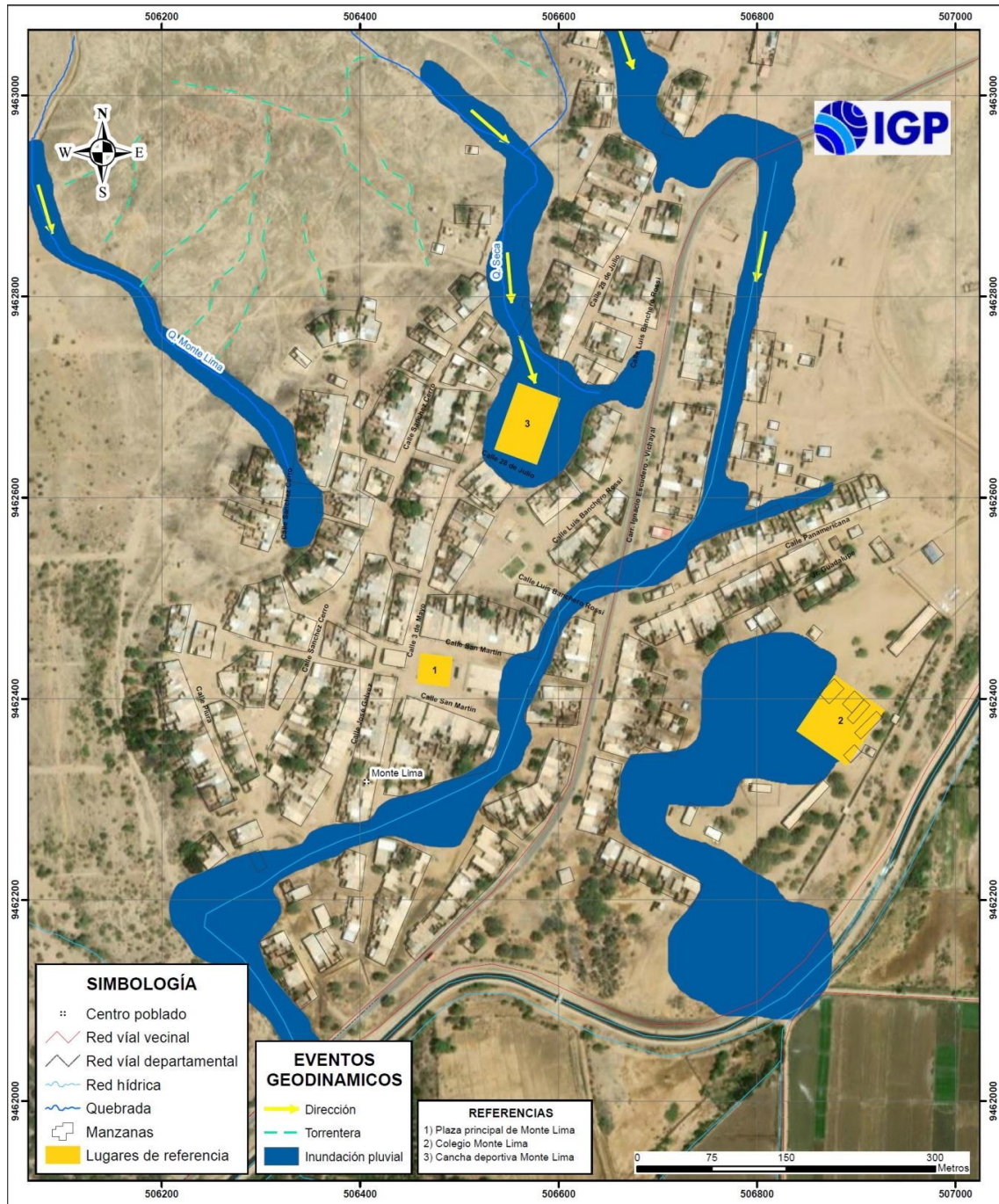


Figura 16. Con la información recopilada en campo, se generó el mapa geodinámico de Monte Lima, delimitando las áreas susceptibles a inundaciones pluviales.

Tabla 2. Ubicación de calicatas.

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREATICO A (m)
ML - 01	506552	9462639	2.50	NP
ML - 02	506764	9462603	3.00	NP
ML - 03	506457	9462459	2.50	NP
ML - 04	506348	9462599	2.50	NP
ML - 05	506404	9462263	2.50	NP

Fuente: Gobierno Regional de Piura. NP= No presenta.

Clasificación de suelos SUCS en el área urbana de Monte Lima: En base a la información recolectada de las calicatas y los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos y de plasticidad realizados por el Gobierno Regional de Piura, se han identificado 05 tipos de suelos, los mismos que han sido agrupados haciendo uso del Sistema de Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y cuyos resultados son (Tabla 3 y Figura 17):

- Suelos Tipo ML: Están conformados por limos inorgánicos con arena muy fina, de humedad baja (6.80%), constituyen suelos de compacidad media, presenta moderada plasticidad (debido a la presencia de material fino) y densidad natural de 1.142 gr/cm³. Abarcan el 26% del área de estudio y ha sido identificado en las inmediaciones de la cancha deportiva del C.P. Monte Lima.
- Suelos tipo CL: Están conformados por arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, de humedad moderada (10.20%), constituyen suelos de compacidad media a alta, presenta baja a media plasticidad (debido a la presencia de material fino) y densidad natural de 1.112 gr/cm³. Abarcan el 30% del área de estudio y ha sido identificado en las inmediaciones de la plaza principal del C.P. Monte Lima (parte central del área urbana).
- Suelos Tipo CH: Están conformados por arcillas inorgánicas de alta plasticidad, de humedad baja (8.50%), constituyen suelos de compacidad media a alta, presenta alta plasticidad y densidad natural de 1.125 gr/cm³. Abarcan el 4% del área de estudio y ha sido identificado en el extremo noroeste de la plaza principal del C.P. de Monte Lima.

- Suelos tipo SM: Están conformados por arena limosa, con contenido de humedad de entre 7.00 – 9.60 %, constituyen suelos de compacidad suelta a media, presentan moderada plasticidad (debido a la presencia de material fino). Presenta densidad natural de 1.117 gr/cm³. Abarcan el 16% del área urbana del C.P. de Monte Lima y se sitúa en las inmediaciones del colegio Monte Lima.
- Suelos tipo SC – SM: Están conformados por arenas arcillosas con limo, de humedad alta (22.70%), constituyen suelos de compacidad baja a media, presenta muy baja plasticidad (IP=4) y densidad natural de 1.428 gr/cm³. Este tipo de suelos abarca el 24% del área urbana del C.P. de Monte Lima y ha sido identificado en la calicata 5, situada en el extremo suroeste de la plaza principal de Monte Lima.

A continuación, se establece un cuadro resumen de los tipos de suelos existentes en el área urbana del C.P. Monte Lima.

Tabla 3. Clasificación SUCS de los suelos de las 5 calicatas elaboradas en el área urbana del C.P. Monte Lima.

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	GRAVAS % (>4.76 mm)	ARENAS % (>0.074 mm, <4.76 mm)	FINOS % (<0.074 mm)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACIÓN SUCS	DENOMINACIÓN
ML - 01	2.50	N.P.	0.00	19.00	81.00	48	28	20	6.80	ML	Limo de baja plasticidad con arena
ML - 02	3.00	N.P.	0.00	72.90	27.10	-	-	-	7.00	SM	Arena limosa
ML - 03	2.50	N.P.	0.00	41.70	58.30	30	22	8	10.20	CL	Arcilla de media plasticidad arenosa
ML - 04	2.50	N.P.	0.00	23.90	76.10	60	22	38	8.50	CH	Arcilla de alta plasticidad con arena
ML - 05	2.50	N.P.	0.00	77.30	22.70	23	19	4	22.70	SC - SM	Arena arcillosa con limo

Fuente: Gobierno Regional de Piura. N.P. = No presenta

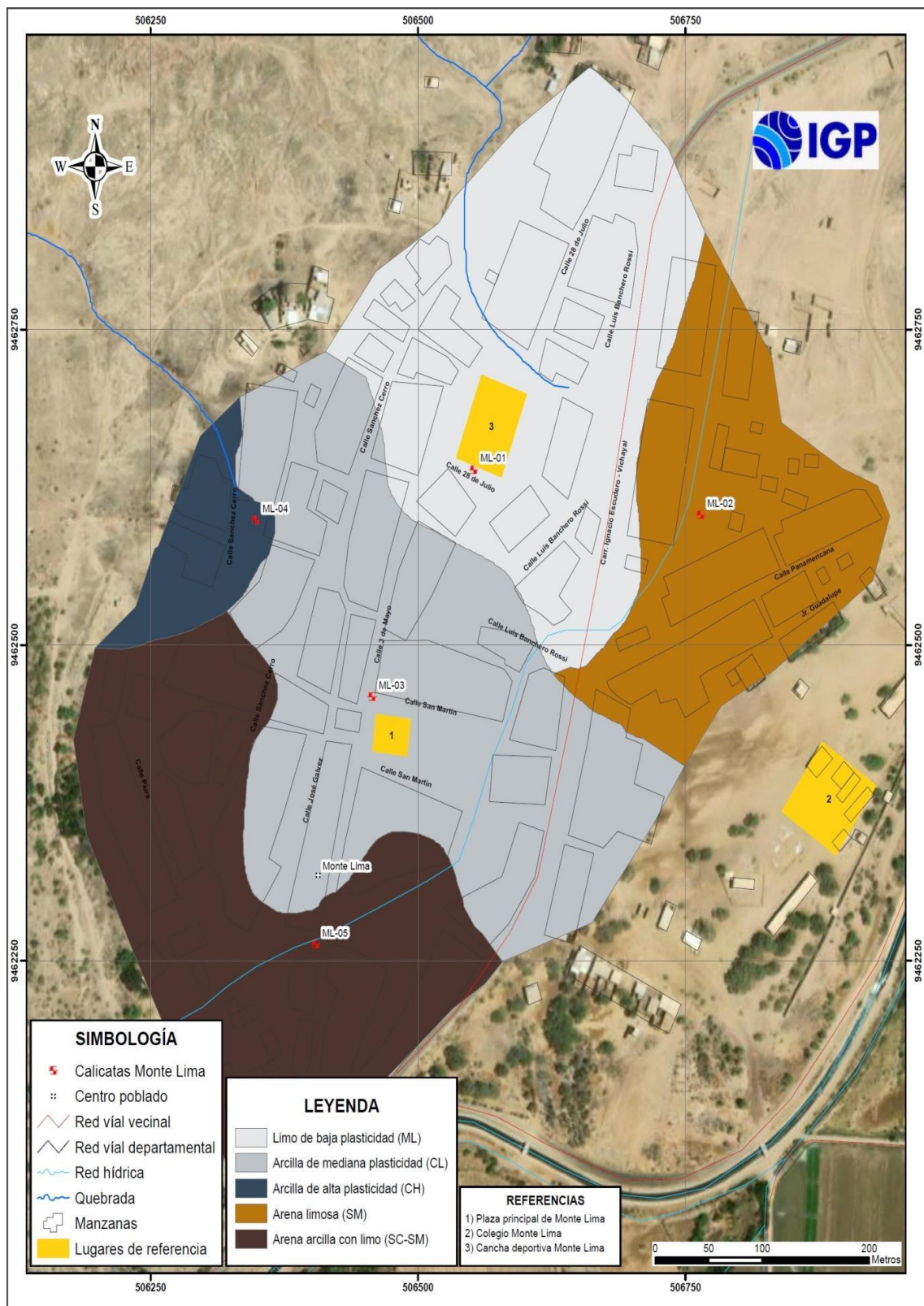


Figura 17. Mapa de clasificación SUCS de suelos en el área urbana del C.P. Monte Lima.

Análisis químico de suelos: Con el fin de determinar el contenido de sales solubles en suelos, el Gobierno Regional de Piura realizó ensayos de análisis químico a las 5 muestras extraídas de las cinco calicatas. Los resultados obtenidos indican lo siguiente:

- Calicata ML 01, muestra 0.253%
- Calicata ML 02, muestra 0.358%
- Calicata ML 03, muestra 0.336%
- Calicata ML 04, muestra 0.382%
- Calicata ML 05, muestra 0.150%.

Considerando estos resultados y haciendo la comparativa con los límites permisibles de agresividad del suelo al concreto (Tabla 4), se determina que todas las calicatas se encuentran dentro del límite permisible.

Tabla 4. Límites permisibles de agresividad del suelo al concreto.

Presencia en el Suelo de:	p.p.m.	Grado de Alteración ppm	Observaciones
*Sulfatos	0-1000	Leve	Ocasiona un ataque químico directo a las estructuras de concreto
	1000-2000	Moderado	
	2000-20 000	Severo	
	>20 000	Muy Severo	
**Cloruros	> 600	Perjudicial	Ocasiona problemas de corrosión de armaduras o elementos metálicos.
	> 1000		
	> 1500		
**Sales Soluble totales	>5 000	Perjudicial	Ocasiona problemas de pérdida de resistencia mecánica por problema de lixiviación

Fuente: Reglamento Nacional de Construcción, NTE E060 Concreto Armado.

Ensayo de corte directo (Norma ASTM D – 3080): La finalidad del ensayo de corte directo es determinar la resistencia al esfuerzo de corte de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones (esfuerzos verticales y horizontales) que simula que existe o existirá en el terreno producto de la aplicación de carga. Esta resistencia al corte de los suelos se debe a dos componentes: la cohesión (comportamiento plástico que presentan

las partículas finas) y el ángulo de fricción interna (rozamiento que existe en las partículas granulares).

Para conocer esta resistencia al corte en laboratorio se usa el equipo de corte directo, siendo el más usado una caja de sección cuadrada o circular dividida horizontalmente en dos mitades. Dentro de ella se coloca la muestra de suelo con dos placas de piedra porosa en ambos extremos, se aplica una carga vertical de confinamiento (Pv) y luego una carga horizontal (Ph) creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra.

Los parámetros geotécnicos obtenidos de los ensayos de corte directo que fueron realizados en el laboratorio de mecánica de suelos del Gobierno Regional de Piura a las muestras de suelos extraídas en el C.P. Monte Lima se presentan en el Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros geotécnicos obtenidos de las muestras tomadas en el área urbana de Monte Lima.

CALICATA	ML-1	ML-2	ML-3	ML-4	ML-5
ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	18	17	14	13	17
COHESIÓN	0.02	0.00	0.02	0.09	0.00

Fuente: Gobierno Regional de Piura.

La tabla 5 indica que, los suelos del C.P. Monte Lima presentan ángulos de fricción entre 13 y 18°, así como cohesión de 0.02 y 0.09.

Capacidad de carga admisible: Se define como el esfuerzo máximo que puede ser aplicado a la masa de suelo de tal forma que se cumplan los requerimientos básicos y se encuentra establecido por la relación entre la carga última y un factor de seguridad cuyo valor es de 3, de acuerdo con la norma técnica peruana para el diseño de cimentaciones E.050.

Carga última (Qult.): Es la presión última por unidad de área de la cimentación soportada por el suelo, en exceso de la presión causada por el suelo alrededor al nivel de

la cimentación (Amézquita, J. et al, 2012). Para determinar la carga última se usaron los resultados de los ensayos de corte directo (ángulo de fricción y la cohesión), datos que se usarán con la fórmula de corte general (suelos granulares densos y cohesivos de consistencia rígida) y local (suelos granulares sueltos y cohesivos de consistencia media a semidura) de Terzaghi (1943), a través de las siguientes expresiones:

Fórmula para falla por corte general

$$q_u = cN_c S_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma$$

Fórmula para falla por corte local

$$q_u = \frac{2}{3} * c * N'_c + q * N'_q + \frac{1}{2} * \gamma * B * N'_\gamma$$

Dónde: C= cohesión, q= carga ($\alpha * D_f$) y N_c , N_q , N_γ : Factores de carga, Tabla 6.

Luego, en base a los resultados de la carga última (Qult.) se calculó la capacidad de carga admisible de los suelos para una profundidad de cimentación de 1.0 metro y ancho de zapata de 1.0 metro, así como también para profundidad de cimentación de 1.50 metros y ancho de zapata de 1.00 metro. Los resultados de capacidad de carga admisible de suelos analizados se presentan en los Tabla 7.

De los resultados citados anteriormente y tomando en cuenta la Tabla 8, se ha determinado que para la profundidad de 1 y 1.5 metros, los suelos de cimentación del centro poblado Monte Lima presentan capacidad de carga admisible muy baja (menor a 1.00 kg/cm^2), (Figura 18).

Tabla 6. Factores de cohesión, carga y volumétricos. Modificado por Terzaghi.

TERZAGHI (según Kumbhojkar, 1993)				Modificado por TERZAGHI			
Ángulo Fi	Nc	Nq	Ng	Ángulo Fi	Nc	Nq	Ng
0	5.7	1	0	0	5.7	1	0
1	6	1.1	0.01	1	5.9	1.07	0.005
2	6.3	1.22	0.04	2	6.1	1.14	0.02
3	6.62	1.35	0.06	3	6.3	1.22	0.04
4	6.97	1.49	0.1	4	6.51	1.3	0.055
5	7.34	1.64	0.14	5	6.74	1.39	0.074
6	7.73	1.81	0.2	6	6.97	1.49	0.1
7	8.15	2	0.27	7	7.22	1.59	0.128
8	8.6	2.21	0.35	8	7.47	1.7	0.16
9	9.09	2.44	0.44	9	7.74	1.82	0.2
10	9.61	2.69	0.56	10	8.02	1.94	0.24
11	10.16	2.98	0.69	11	8.32	2.08	0.3
12	10.76	3.29	0.85	12	8.63	2.22	0.35
13	11.41	3.69	1.04	13	8.96	2.38	0.42
14	12.11	4.02	1.26	14	9.31	2.55	0.48
15	12.86	4.45	1.52	15	9.67	2.73	0.57
16	13.68	4.92	1.82	16	10.06	2.92	0.67
17	14.6	5.45	2.18	17	10.47	3.13	0.76
18	15.12	6.04	2.59	18	10.9	3.36	0.88
19	16.56	6.7	3.07	19	11.36	3.61	1.03
20	17.69	7.44	3.64	20	11.85	3.88	1.12
21	18.92	8.26	4.31	21	12.37	4.17	1.35
22	20.27	9.19	5.09	22	12.92	4.48	1.55
23	21.75	10.23	6	23	13.51	4.82	1.74
24	23.36	11.4	7.08	24	14.14	5.2	1.97
25	25.13	12.72	8.34	25	14.8	5.6	2.25
26	27.09	14.21	9.84	26	15.53	6.05	2.59
27	29.24	15.9	11.6	27	16.3	6.54	2.88
28	31.61	17.81	13.7	28	17.13	7.07	3.29
29	34.24	19.98	16.18	29	18.03	7.66	3.76
30	37.16	22.46	19.13	30	18.99	8.31	4.39
31	40.41	25.28	22.65	31	20.03	9.03	4.83
32	44.04	28.52	26.87	32	21.16	9.82	5.51
33	48.09	32.23	31.94	33	22.39	10.69	6.32
34	52.64	36.5	38.04	34	23.72	11.67	7.22
35	57.75	41.44	45.41	35	25.18	12.75	8.35
36	63.53	47.16	54.36	36	26.77	13.97	9.41
37	70.01	53.8	65.27	37	28.51	15.32	10.9
38	77.5	61.55	78.61	38	30.43	16.85	12.75
39	85.97	70.61	95.03	39	32.53	18.56	14.71
40	95.66	81.27	115.31	40	34.87	20.5	17.22
41	106.81	93.85	140.51	41	37.45	22.7	19.75
42	119.67	108.75	171.99	42	40.33	25.21	22.5
43	134.58	126.5	211.56	43	43.54	28.06	26.25
44	151.95	147.74	261.6	44	47.13	31.34	30.4
45	172.28	173.28	325.34	45	51.17	35.11	36
46	196.22	204.19	407.11	46	55.73	39.48	41.7
47	224.55	241.8	512.84	47	60.91	44.45	49.3
48	258.28	287.85	650.67	48	66.8	50.46	59.25
49	298.71	344.63	831.99	49	73.55	57.41	71.45
50	347.5	415.14	1072.8	50	81.31	65.6	85.75

Fuente: Braja Das, 2011.

Tabla 7. Capacidad de carga admisible de las muestras extraídas en el centro poblado Monte Lima.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Tipo de Corte	Capacidad de carga última (Kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Tipo de Corte
ML-01	1.22	0.41	F.L	1.61	0.54	F.L
ML-02	0.84	0.28	F.L	1.17	0.39	F.L
ML-03	0.86	0.29	F.L	1.12	0.37	F.L
ML-04	1.32	0.44	F.L	1.54	0.51	F.L
ML-05	1.02	0.34	F.L	1.42	0.47	FL
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m ancho:1.00m (Zapata Cuadrada)			Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00m (Zapata cuadrada)		

Fuente: Gobierno Regional de Piura, 2022. Dónde: F.L= Falla local.

Tabla 8. Rango de capacidad de carga admisible.

CAPACIDAD CARGA ADMISIBLE (kg/cm ²)	DENOMINACIÓN
< 1.0	MUY BAJA
1.0 - 2.0	BAJA
2.0 - 3.0	MEDIA
> 3.0	ALTA

Fuente: IGP, 2018.

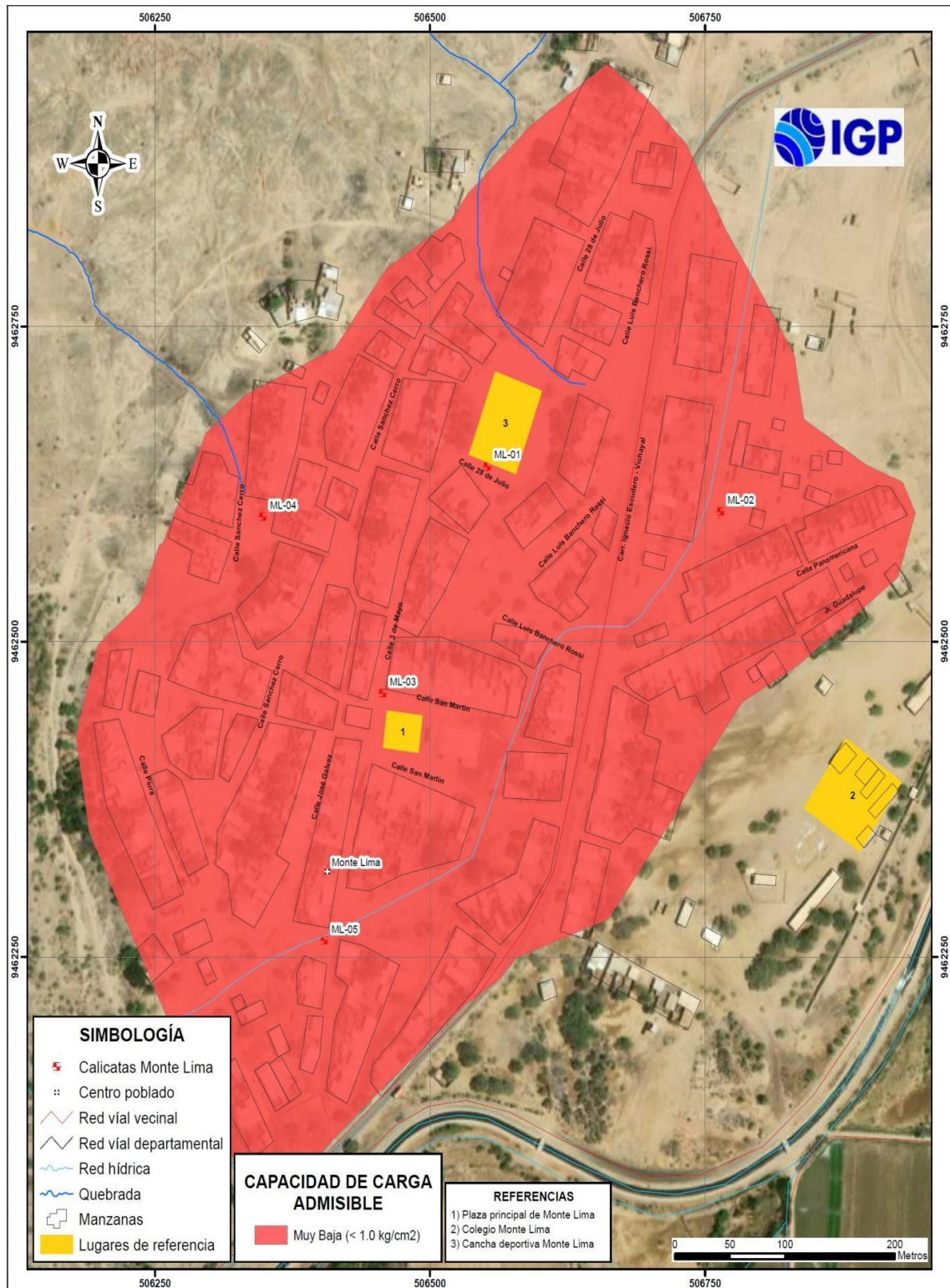


Figura 18. Mapa de capacidad de carga admisible de los suelos de cimentación del C.P. Monte Lima, para una profundidad de cimentación de 1.0 metro y ancho de zapata de 1.0 metro.

3. EVALUACIÓN GEOFÍSICA

A fin de conocer los diferentes parámetros físicos que controlan el comportamiento dinámico de la estructura del suelo en el área urbana del centro poblado Monte Lima, se procede a aplicar diferentes métodos geofísicos, cuyos resultados se correlacionan entre sí y con los aspectos geo-ambientales de la zona de estudio.

3.1. METODOLOGÍA

La metodología seguida consiste en la aplicación de tres métodos geofísicos: razones espectrales (H/V) a partir de registros de vibración ambiental, perfiles sísmicos obtenidos mediante el análisis multicanal de ondas superficiales y microtremores (MASW y MAM) y tomografía eléctrica. A continuación se describe cada método.

3.1.1. Razones Espectrales (H/V)

El método de razones espectrales (H/V) fue propuesto por Nakamura (1989) para caracterizar la respuesta dinámica del suelo a partir del periodo de respuesta del suelo y en algunos casos, estimar su amplificación, ante la sollicitación sísmica. El método hace uso de registros de vibración ambiental que contienen información sobre las características físicas de los suelos en sus primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de los tipos de suelos, espesor, geometría y composición litológica, condicionan, la amplificación de las ondas sísmicas.

En la Figura 19, se muestra un ejemplo del proceso de análisis seguido usando como dato de entrada el registro de vibración ambiental (ML-03) obtenido en campo. El primer recuadro presenta la selección de las ventanas de procesamiento para las tres componentes de la señal registrada (Vertical, N-S y E-O), seguidamente la curva H/V, en la cual la curva continua negra es el promedio del cociente H/V; mientras que, las curvas discontinuas son la desviación estándar, las bandas grises identifican las frecuencias principales. Finalmente, para la presentación de los resultados, las frecuencias son expresadas en periodos dominantes.

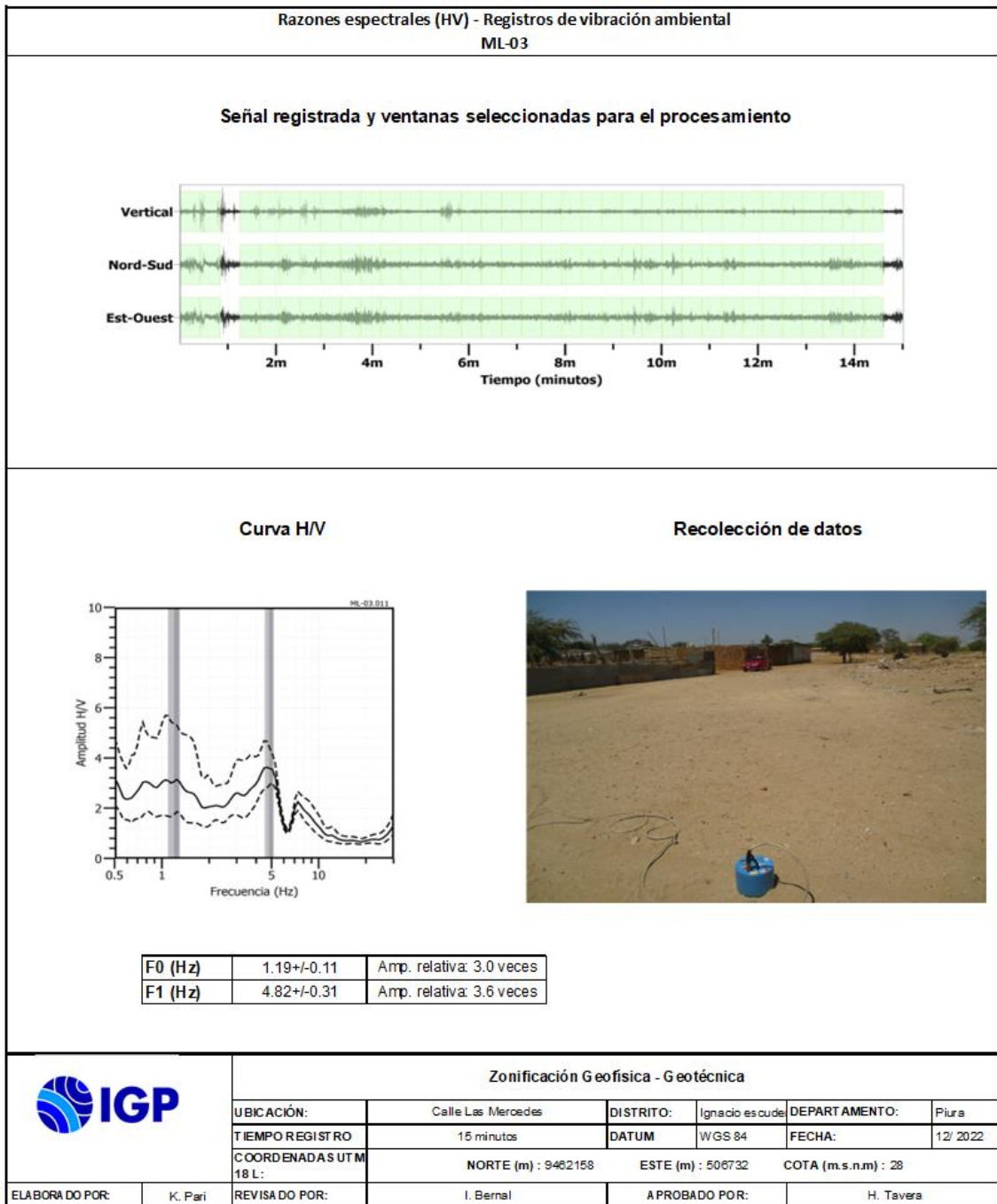


Figura 19. Resultados obtenidos con el método de razones espectrales (H/V) para el punto ML-03. Arriba, la señal registrada y abajo la curva promedio de las razones espectrales (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en líneas discontinuas. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

Para la interpretación de los resultados se considera que: 1) Las frecuencias predominantes menores a 1 Hz corresponden a vibraciones generadas por el oleaje del mar, y/o cambios meteorológicos (periodos muy largos), 2) Las bajas frecuencias o periodos largos son debidas a la presencia de depósitos profundos y 3) Las frecuencias altas o periodos cortos son debidos a depósitos superficiales blandos y de poco espesor (SESAME, 2004; Bernal, 2006). Asimismo, se evalúa la correspondencia de los parámetros físicos-dinámicos encontrados con los aspectos geológicos, geomorfológicos y geotécnicos que domina a la zona de estudio.

3.1.2. Ondas superficiales y microtremores

El Análisis Multicanal de ondas superficiales (MASW) es un método indirecto y permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto; es decir, permite conocer la velocidad de propagación de las ondas de corte (V_s) en el subsuelo, a partir del análisis de la dispersión de ondas superficiales (ondas Rayleigh), generados por una fuente de energía impulsiva y registrada por arreglos lineales de estaciones sísmicas.

El ensayo de Análisis Multicanal de Microtremores (MAM) o sísmica de Microtremores (Louie, 2001), es método complementario al MASW, que al utilizar registros de microtremores permite investigar a mayores profundidades. En este caso no existe fuente sísmica y solo consiste en el registro de la vibración del suelo generada por la actividad humana. La combinación con el método de MASW permite obtener información a niveles superficiales y en profundidad.

Los datos sísmicos recolectados en campo fueron procesados con el programa de computación SeisImager y en su procedimiento, se aplicó la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtener la curva de dispersión que relaciona la velocidad de fase de las ondas superficiales con la frecuencia (Reynolds, 2011). Seguidamente, cada curva de dispersión perteneciente a un mismo arreglo (MASW y MAM), fue sometida a un proceso de inversión a fin de obtener los perfiles V_s en una dimensión (1D) para el punto central de la línea, ver Figura 20.

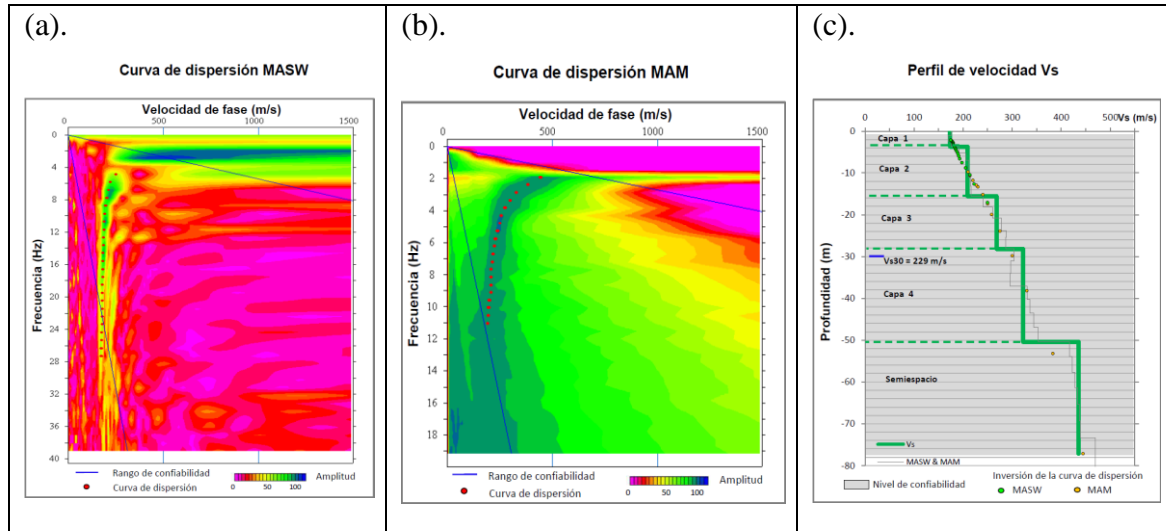


Figura 20. Curvas de dispersión obtenidos a partir de las técnicas MASW (a) y MAM (b) y perfil de velocidad obtenido a partir de la combinación de ambos ensayos (c).

Para el análisis de los resultados obtenidos, se considera la clasificación de suelos propuesta por la Norma E.030 Diseño Sismorresistente (2018). En este caso, el rango de velocidad de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen a fin de considerar dos clasificaciones adicionales, tal como se describe en la Tabla 9.

Tabla 9. Clasificación de perfiles de suelo para la zona de estudio

Clasificación de los perfiles de Suelo			
N°	Vs (m/s)	Tipos de suelo	
1	< 180	Suelo blando	S4
2	180 a 350	Suelo intermedio (medianamente rígido)	S3
3	350 a 500	Suelo rígido	S2
4	500 a 800	Suelo muy rígido	S1
5	800 a 1500	Roca	S0
6	> 1500		

3.1.3. Tomografía de resistividad eléctrica

Es una técnica geofísica, que mediante la inyección de corriente eléctrica al terreno, permite determinar las variaciones de resistividad y conductividad eléctrica de las rocas y suelos. En general, los materiales que conforman el subsuelo muestran ciertos rangos de valores de resistividad (Tabla 10) que dependen de su composición y su contenido de agua o de sales disueltas y presentes en las fracturas de las rocas o en la porosidad del suelo, ellas responderían de manera anómala al paso de la corriente eléctrica. El método de Tomografía Eléctrica es una técnica multielectrónica, y su base teórica de su funcionamiento es análoga al de los métodos convencionales de resistividad (tetraelectrónica). Actualmente, existen diferentes dispositivos eléctricos para la toma de datos en campo y en el presente estudio, se usó el dispositivo Polo-Dipolo.

Tabla 10. Valores representativos de resistividad (Loke et al, 2012)

Material	Resistividad
Suelo artificial	50-100
Arena suelta	500-5000
Grava	50-104
Arcilla	1-100
Rocas ígneas	107-1000
Granito	106-1000
Basalto	107-1000
Esquisto	20-104
Conglomerados	104-1000
Areniscas	10-8000
Lutita	20-1000
Limolita	70-8000
Caliza	100-105
Agua dulce	10-100
Agua de mar	0.25

3.2. ADQUISICIÓN DE DATOS

En el área urbana del centro poblado Monte Lima, se ha recolectado en campo un total de 17 registros de vibración ambiental en puntos distribuidas de manera equidistante, tal como se observa en la Figura 21. Asimismo, se ha considerado datos obtenidos sobre cuatro líneas de arreglos sísmicos y de tres líneas de tomografía eléctrica.

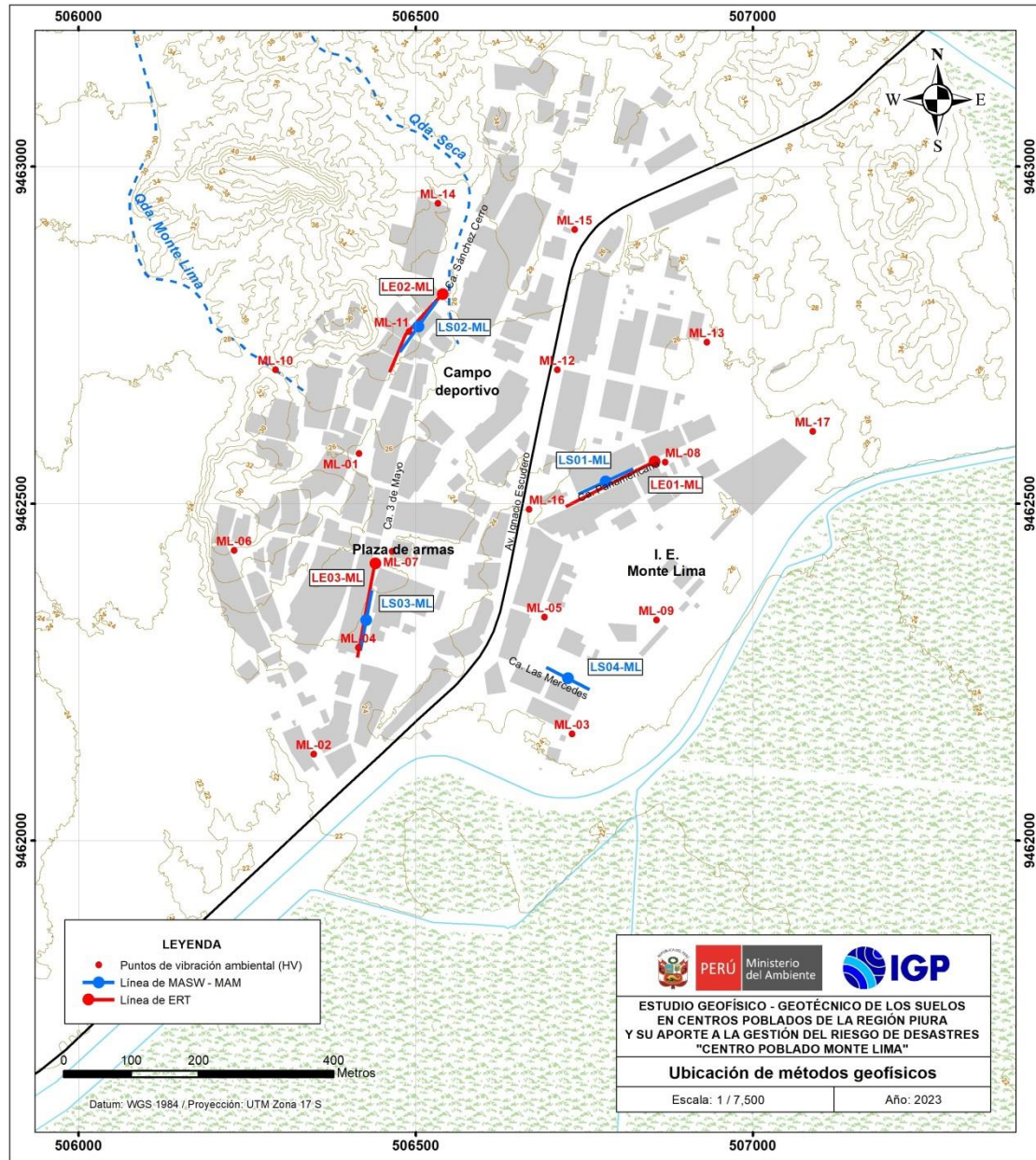


Figura 21. Distribución espacial de los puntos y líneas de adquisición de datos geofísicos en el C.P. Monte Lima.

Registros de vibración ambiental: Para la adquisición de estos registros, se utilizaron sensores Lennartz y registradores CityShark II (Figura 22). Cada registro presenta una duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de datos para su posterior análisis. En la Figura 23, se muestra ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos en el punto ML-14, ubicado por la quebrada Seca. Aquí se observa que la señal es estable; es decir, no está muy perturbada en comparación con la señal de ML-12 que presenta algunos saltos y/o picos de señal debido a que dicho punto, está ubicado cerca a la Av. Ignacio Escudero.



Figura 22. Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensor Lennartz (2N) y registradores CityShark II.

Líneas sísmicas: Para la adquisición de los registros sísmicos se utilizó un equipo sísmico multipropósito, modelo GEODE (Geometrics) de 24 sensores o geófonos de baja frecuencia (4.5 Hz) y un muestreo de 4000Hz (0.25 ms). Como fuente para generar las ondas sísmicas, se utilizó un martillo de 20 lbs (Figura 24).

La distribución de las 4 líneas se presenta en la Figura 21 y los parámetros utilizados para el registro de los datos se detallan en la Tabla 11.

Tomografía eléctrica: Para la adquisición de los datos de resistividad se utilizó el equipo de Resistividad/IP Syscal Pro de marca Iris Instruments (Figura 25) y accesorios (cables multipolar, electrodos, combas, etc.). La distribución de las 3 líneas se presenta en la Figura 21 y los parámetros utilizados para el registro de los datos de resistividad se detallan en la Tabla 12.

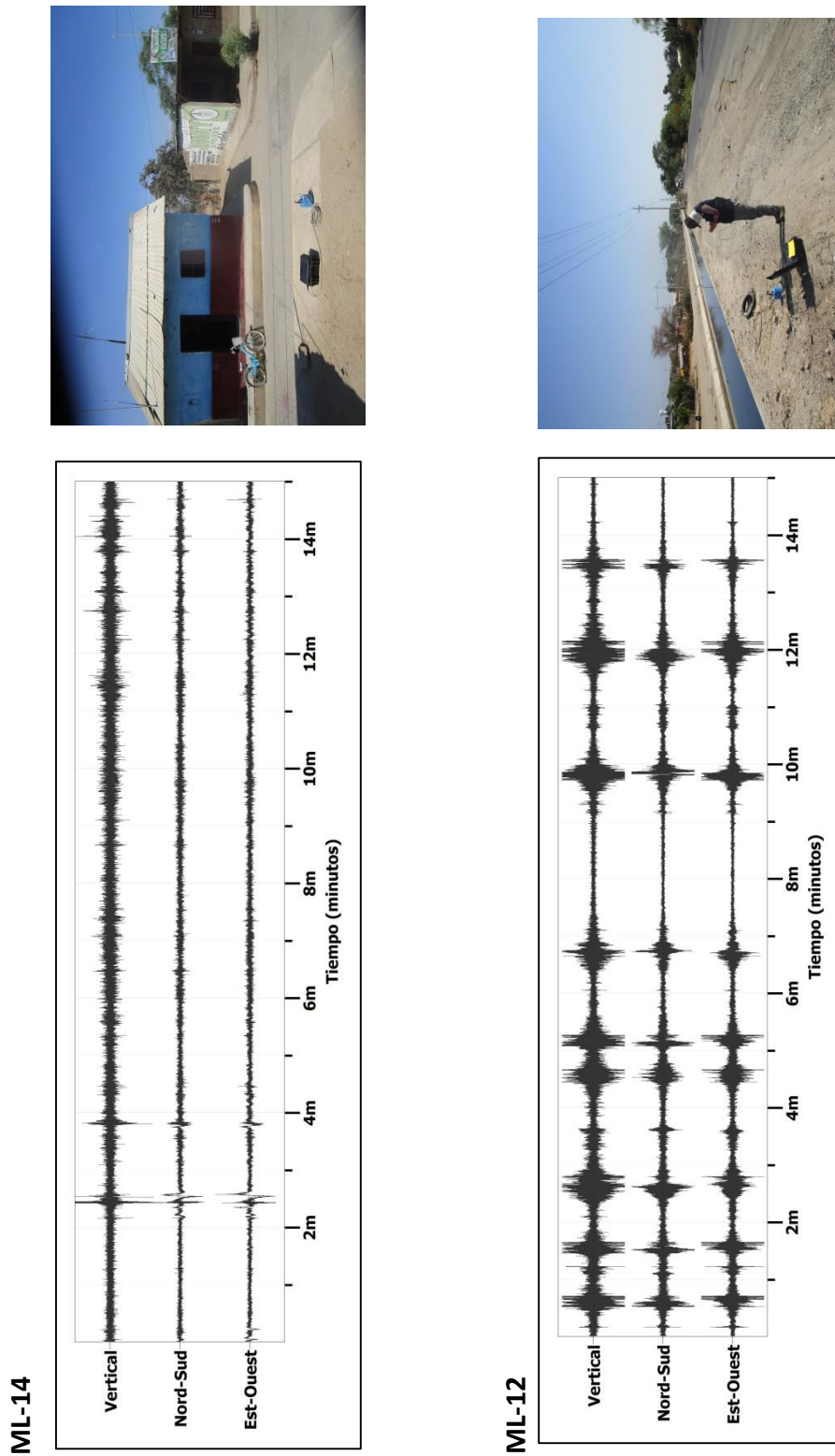


Figura 23. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos en los puntos ML-14 y ML-12, ubicados sobre diferentes tipos de suelos. Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

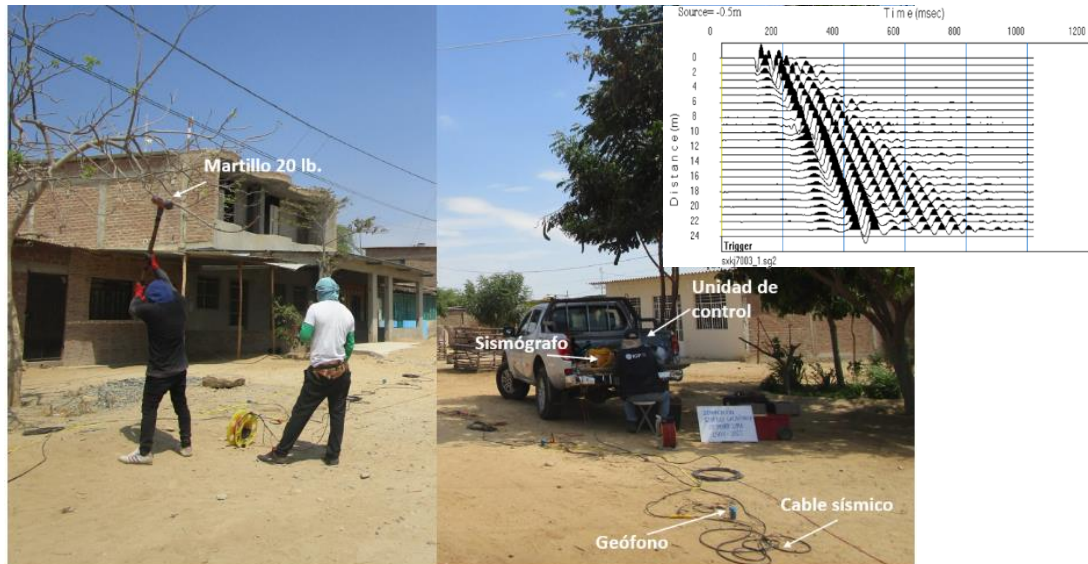


Figura 24. Disposición del equipo para la adquisición de registros sísmicos – MASW.

Tabla 11. Coordenadas y características de las líneas sísmicas

Línea Sísmica	Coordenadas UTM – WGS84		Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total (m)	
	Este (m)	Norte (m)				
MONTE LIMA						
1	LS01-ML	506781	9462532	32	4	92
2	LS02-ML	506501	9462766	39	4	92
3	LS03-ML	506423	9462329	26	4	92
4	LS04-ML	506725	9462243	30	3	69

Tabla 12. Coordenadas y características de las líneas de tomografía eléctrica.

Línea Eléctrica	Coordenadas UTM – WGS84		Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Longitud total (m)	
	Este (m)	Norte (m)				
MONTE LIMA						
1	LE01-ML	506861	9462566	40	10	160
		506722	9462495	39		
2	LE02-ML	506545	9462817	40	10	150
		506461	9462695	42		
3	LE03-ML	506440	9462419	40	10	150
		506413	9462271	42		



Figura 25. Disposición del equipo para la adquisición de datos de resistividad.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Frecuencias predominantes

Los suelos del C.P. Monte Lima, responden a frecuencias $F > 2.0$ Hz, en toda el área de estudio, con amplificaciones de hasta 3.6 veces, las frecuencias menores se distribuyen de manera localizada al extremo sur y extremo norte. Estas características sugieren heterogeneidad en la composición de los suelos. A fin de evaluar el comportamiento dinámico del suelo en el área, se analiza de manera conjunta la información obtenida en cada gráfico de razones espectrales (H/V).

- **Frecuencias predominantes, F_0 :** En la Figura 26 se muestra el mapa con la distribución espacial de los valores de frecuencias F_0 y de acuerdo a los resultados, se tiene el predominio de valores entre 0.75 a 1.20 Hz (0.8-1.3 segundo). Estos valores se presentan de manera localizada hacia el norte y sur del área de estudio y las mayores amplificaciones del suelo se presentan en cada punto analizado de este rango centro poblado Monte Lima. Estos valores bajos de frecuencia estarían asociados a la presencia de una capa sedimentaria de gran espesor.

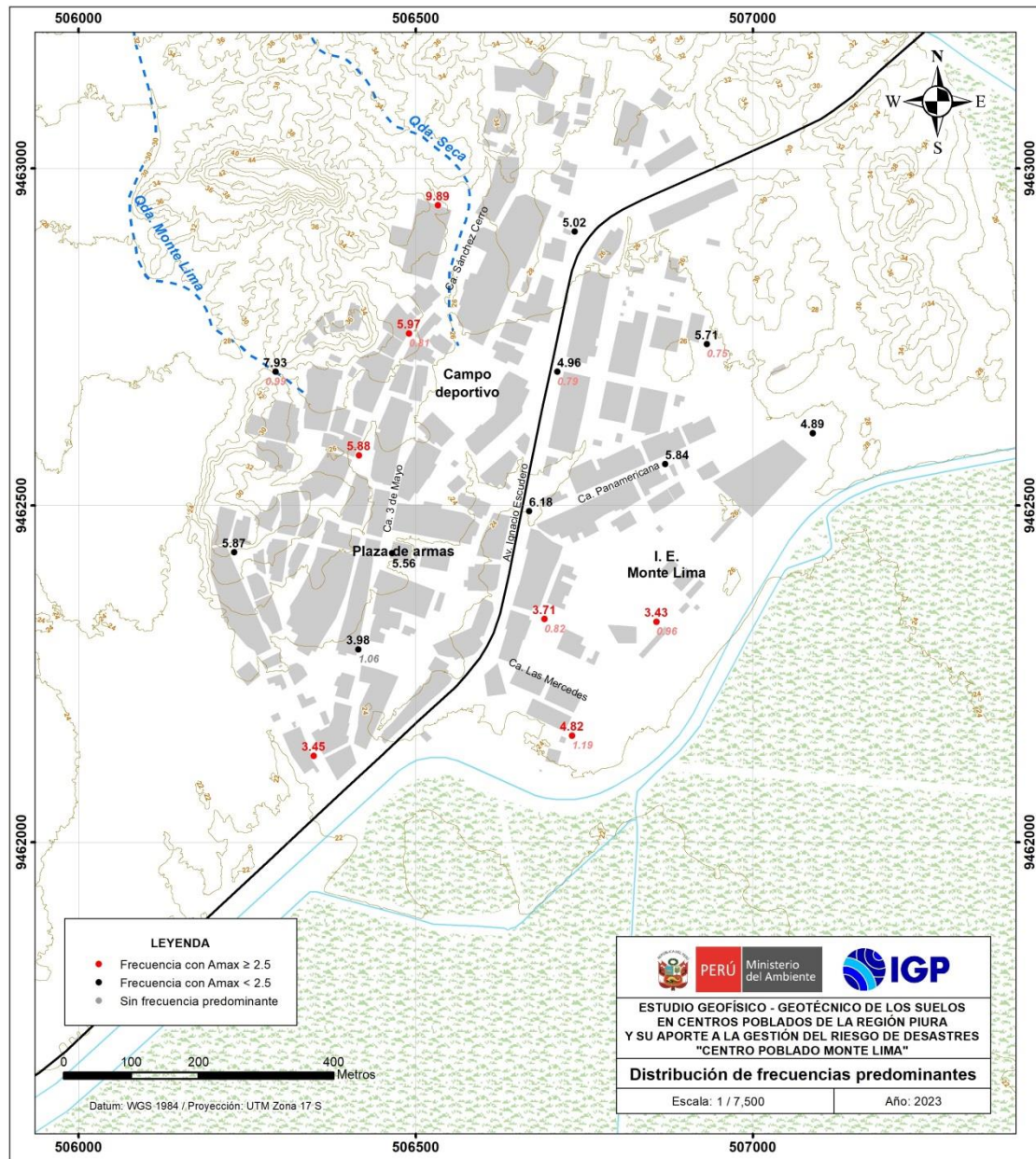


Figura 26. Distribución espacial de las frecuencias F_0 , los valores de mayor tamaño corresponden a frecuencias de entre 3.0 y 10 Hz; y en menor tamaño, corresponde a frecuencias bajas (0.8 y 1.0 Hz). Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 2.5 veces.

En la Figura 27 se muestra ejemplos de razones espectrales (H/V) característicos para el área de estudio y corresponden a los puntos ML-03, ML-05 y ML-09, ubicados al sur este, los dos primeros por la calle Las Mercedes y el último por la I.E. Monte Lima. En todos se observa la existencia de un pico definido con frecuencias de 1.19, 0.82 y 0.96 Hz y amplificaciones de 3.0, 3.1 y 6.3 veces respectivamente. Asimismo, estos

puntos responden a frecuencias de 4.82, 3.71 y 3.43 Hz con amplificaciones de 3.6, 3.0 y 3.4 veces. En general, estos resultados evidencian que los suelos en el C.P. Monte Lima, son heterogéneos.

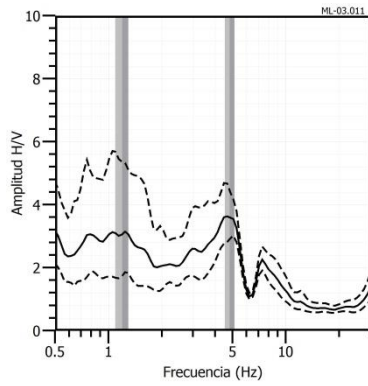
- **Frecuencias predominantes, F1:** En la Figura 26 se muestra el mapa con la distribución espacial de los valores de frecuencias F1 y de acuerdo a los resultados, se tiene el predominio de valores entre 3.45 a 9.0 Hz (0.1-0.3 segundo). Estos valores se presentan de manera uniforme en toda el área de estudio y las mayores amplificaciones del suelo se presentarían principalmente en la zona noroeste y sur del C.P. Monte Lima.

En la Figura 28 se muestra ejemplos de razones espectrales (H/V) característicos para el área de estudio y corresponden a los puntos ML-06, ML-11 y ML-12, ubicados el primero al oeste, el segundo al norte en la calle Sánchez Cerro y el tercero al noreste en la Av. Ignacio Escudero. En todos se observa la existencia de un pico bien definido con frecuencias de 5.87, 5.84 y 4.96 Hz con amplificaciones de 2.09, 2.30 y 1.65 veces respectivamente. Asimismo, en los puntos ML-11 y M-12 responden a frecuencias de 0.81 y 0.79 Hz con amplificaciones de 2.8 y 3.19 veces. En general, estos resultados evidencian que los suelos en el C.P. Monte Lima, son heterogéneos.

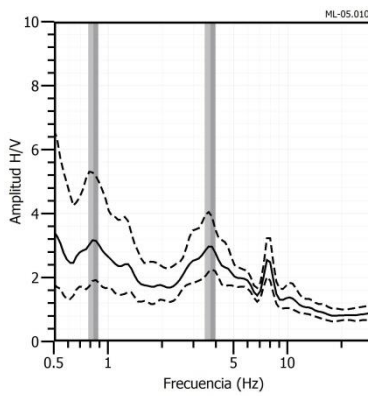
Interpretación

El análisis de las razones espectrales H/V en el área de estudio ha permitido observar que los suelos del área urbana de Monte Lima responden predominantemente a frecuencias que fluctúa entre 3.45 a 9.0 Hz, evidenciando la existencia de suelos cuya respuesta dinámica ante la ocurrencia de un sismo, es distinto en el área de estudio con amplificaciones relativas variables, sugiriendo la presencia de suelos heterogéneos. Sin embargo, en la zona central del área de estudio (inmediaciones de la Plaza de Armas y calle Panamericana), se puede observar que los suelos muestran bajas amplificaciones evidenciando la presencia de suelos más compacto.

ML-03



ML-05



ML-09

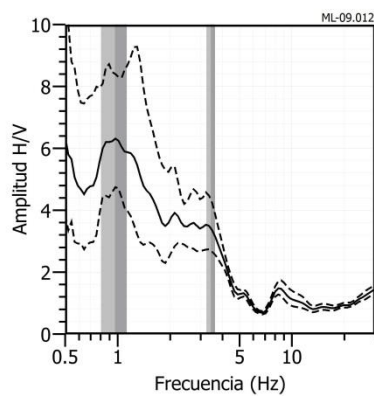
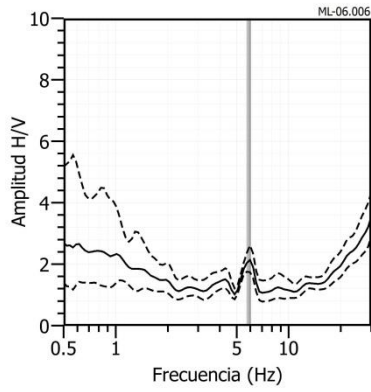
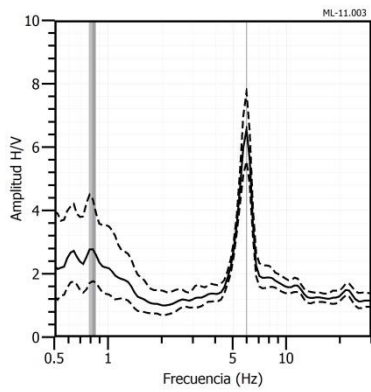


Figura 27. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F < 2.0\text{Hz}$): Para los puntos ML-03, ML-05 y ML-09, ubicados al sur este los dos primeros por la calle Las Mercedes y el último por la I.E. Monte Lima. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

ML-06



ML-11



ML-12

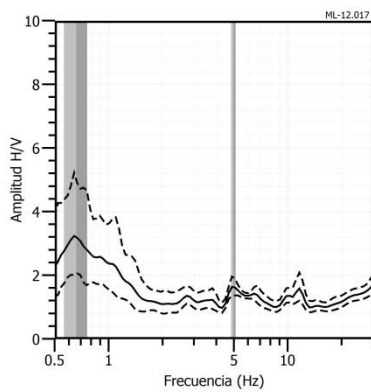


Figura 28. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F > 2.0\text{Hz}$): Para los puntos ML-06, ML-11 y ML-12, ubicados el primero al oeste, el segundo al norte en la calle Sánchez Cerro y el tercero al noreste en la Av. Ignacio Escudero. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

- **Periodos dominantes:** A partir de las frecuencias predominantes, se obtiene los periodos de respuesta del suelo y su distribución se muestra en la Figura 29. En este caso, en el área de estudio los suelos responden a un rango de periodos bien definido con valores de 0.1 a 0.3 segundos, con amplificaciones máximas relativas de hasta 6 veces. Asimismo, con mínimas amplificaciones, hacia la zona central del C.P. Monte Lima.

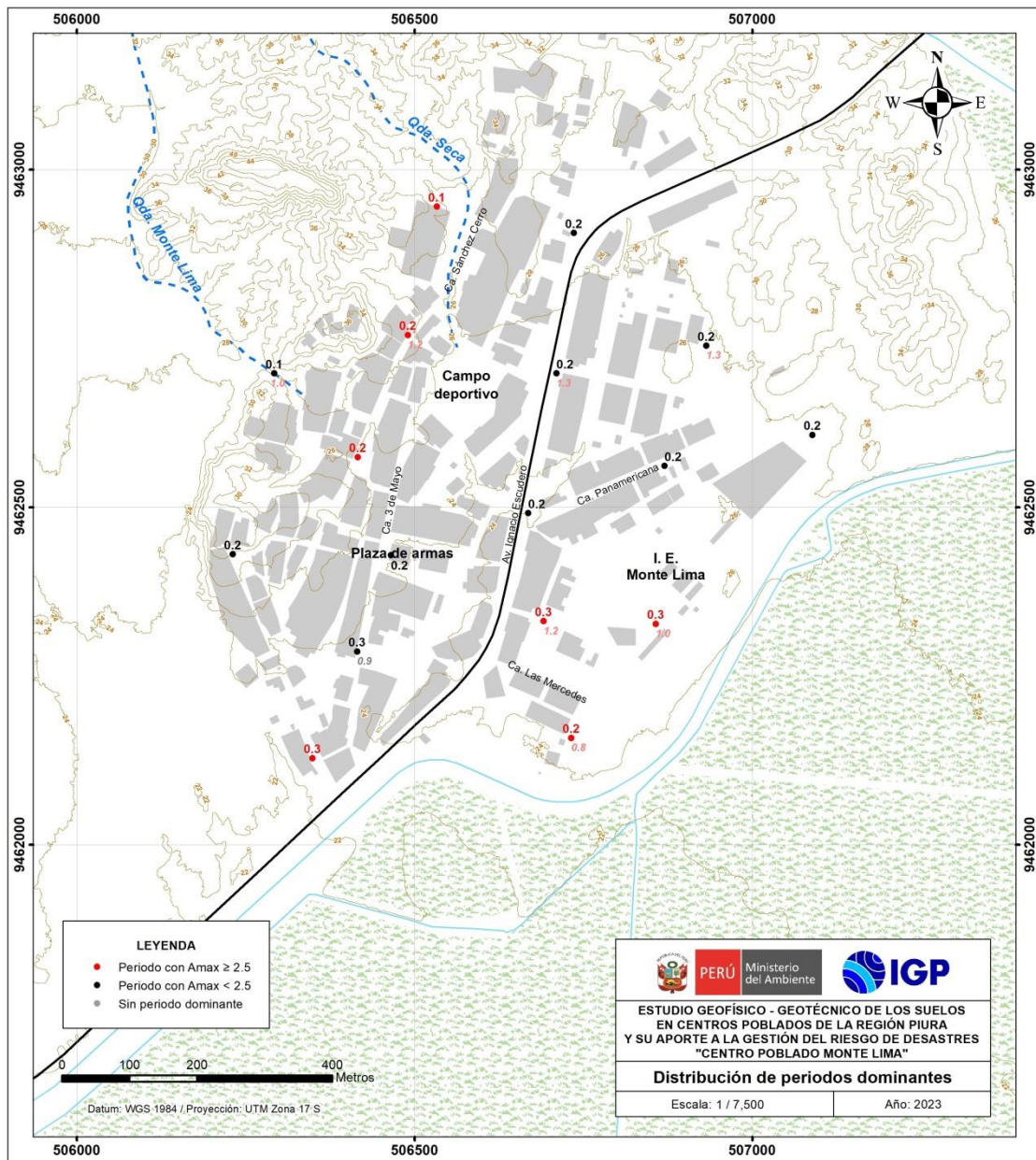


Figura 29. Distribución espacial de periodos dominantes del suelo para el centro poblado Monte Lima. Los valores en rojo corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 2.5 veces.

3.3.2. Perfiles sísmicos

A continuación, se describen las características observadas en los perfiles de velocidad de ondas de corte (V_s) obtenidos con los métodos sísmicos MASW – MAM. En la Figura 30, se presenta el perfil sísmico obtenido para la línea LS01-ML y en el Anexo 2, para las líneas restantes.

Línea sísmica LS01-ML: Realizada en la calle Panamericana, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 80 metros. Este perfil permite identificar la existencia de cuatro (4) capas sísmicas: La primera de 5 metros de espesor y velocidad V_s de 160 m/s corresponde a suelo blando. La segunda capa de 8 metros de espesor y velocidad V_s de 264 m/s corresponde a suelo intermedio (medianamente rígido), la tercera capa de 21 metros de espesor y velocidad V_s que decrece a 443 m/s corresponde a suelos rígido. La cuarta capa, con espesor de 16 metros y velocidad de 554 m/s junto al semiespacio, con velocidad $V_s > 750$ m/s, sugiere suelo muy rígido.

Línea sísmica LS02-ML: Ubicada en la calle Sánchez Cerro, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 76 metros. Este perfil permite identificar la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 5 metros de espesor y velocidad V_s de 259 m/s junto a la segunda capa de 10 metros de espesor y velocidad de 346 m/s corresponden a suelo intermedio (medianamente rígido). La tercera capa de 13 metros de espesor y velocidad V_s de 454 m/s corresponde a suelo rígido. El semiespacio, con velocidad $V_s > 540$ m/s, sugiere suelo muy rígido.

Línea sísmica LS03-ML: Realizada en la calle 3 de Mayo, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 72 metros. Este perfil permite identificar la existencia de cuatro (4) capas sísmicas: La primera de 4 metros de espesor y velocidad V_s de 169 m/s corresponde a suelo blando. La segunda capa de 5 metros de espesor y velocidad V_s de 245 m/s corresponde a suelo intermedio (medianamente rígido), la tercera capa de 14 metros de espesor y velocidad V_s que decrece a 377 m/s corresponde a suelos rígido. La cuarta capa, con espesor de 11 metros y velocidad de 519 m/s junto al semiespacio, con velocidad $V_s > 632$ m/s, sugiere suelo muy rígido.

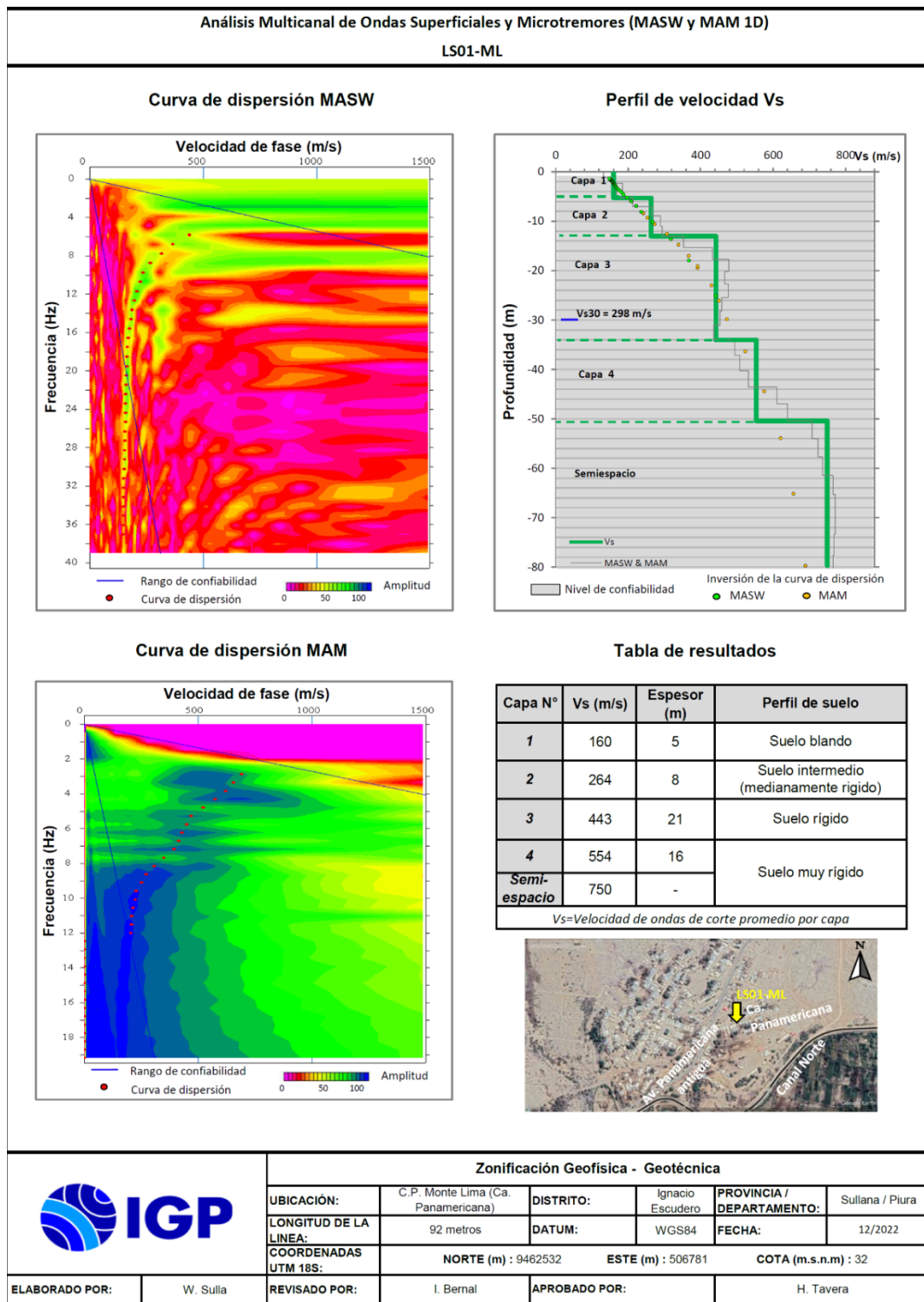


Figura 30. Resultados obtenidos con el ensayo MASW y MAM para la línea sísmica LS01-ML.

Línea sísmica LS04-ML: Realizada en la calle Las Mercedes, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 70 metros. Este perfil permite identificar la existencia de cuatro (4) capas sísmicas: La primera de 7 metros de espesor y velocidad V_s de 150 m/s corresponde a suelo blando. La segunda capa de 11 metros de espesor y velocidad V_s de 336 m/s corresponde a suelo intermedio (medianamente rígido), la tercera capa de 19 metros de espesor y velocidad V_s que decrece a 451 m/s corresponde a suelos rígido. La cuarta capa, con espesor de 17 metros y velocidad de 526 m/s junto al semiespacio, con velocidad $V_s > 641$ m/s, sugiere suelo muy rígido

En la Tabla 13, se resume los valores de velocidad de ondas de corte (V_s) para cada uno de los perfiles de suelo obtenidos en el área de estudio.

Tabla 13. Valores de espesor y V_s de los perfiles sísmicos obtenidos para el área de estudio.

Superficie		→ Profundidad									
Línea Sísmica	N° DE CAPA										
	1		2		3		4		Semiespacio		VS30 (m/s)
	V_s (m/s)	Esp. (m)	V_s (m/s)	Esp. (m)	V_s (m/s)	Esp. (m)	V_s (m/s)	Esp. (m)	V_s (m/s)	Esp. (m)	
LS01-ML	160	5	264	8	443	21	554	16	750	-	298
LS02-ML	259	5	346	10	454	13	540	-	-	-	369
LS03-ML	169	4	245	5	377	14	519	11	632	-	318
LS04-ML	150	7	336	11	451	19	526	17	641	-	283

- Suelo blando ($V_s < 180$ m/s)
- Suelo intermedio - medianamente rígido (180 – 350 m/s)
- Suelo rígido (350 – 500 m/s)
- Suelo muy rígido (500 – 800 m/s)
- Roca moderadamente dura a dura (>800 m/s)

Interpretación

En el área urbana del C.P. Monte Lima, se ha identificado una capa superficial de suelo blando ($v_s=150$ a 169 m/s) de 4 a 7 metros de espesor, principalmente hacia el sur, que cubre a suelo medianamente rígido ($v_s=245$ a 346 m/s), correspondiente a una capa intermedia de 5 a 15 metros de espesor. Este a su vez, cubren a una capa de suelos rígidos ($v_s=377$ a 454 m/s) de 13 a 21 metros de espesor.

En conjunto, los espesores de los suelos blandos, medianamente rígidos y rígidos van de 23 y 28 metros en dirección oeste y norte, por el sector 03 de Mayo y calle Sánchez Cerro, y de 34 y 37 metros en dirección este y sur, por las calles Panamericana y Las Mercedes, ver Figura 31.

Por debajo se identifican los suelos muy rígidos, correspondientes al conglomerado, esto sugiere que el suelo superficial corresponden a depósitos aluviales de mediano espesor.

En este contexto, el suelo blando es debido a la presencia de material residual depositado por inundación pluvial y se encuentra sobre los depósitos aluviales; por lo tanto, corresponde a material con presencia de humedad, influyendo en la pérdida de rigidez del suelo.

Para el área de estudio, el Vs30 calculado, de 369 m/s, corresponde a suelos Tipo S2 y entre 283 y 318 m/s, corresponde a suelos Tipo S3; es decir, suelos rígidos hacia el norte y medianamente rígidos en el resto del área de estudio (Adaptación de la clasificación de suelos, indicada en la Norma sismorresistente E.030, al área de estudio).

3.3.3. Secciones geoelectricas

A continuación, se describen las características observadas en las secciones geoelectricas con resolución de hasta los 40 metros de profundidad. En la Figura 32, se presenta la sección obtenida para la línea LE01-ML y en el Anexo 2, para las secciones restantes

- **Sección geoelectrica LE01-ML:** Realizada en la calle Panamericana sobre una longitud de 160 metros y en dirección NE-SO. En esta sección predominan los depósitos con baja resistividad ($< 80 \text{ Ohm-m}$), debido a la presencia de conglomerados con areniscas de la formación Chira con alto contenido de humedad, espesores mayores a 40 metros. Además, se presentan tres anomalías con mayor contenido de humedad y espesores variables.

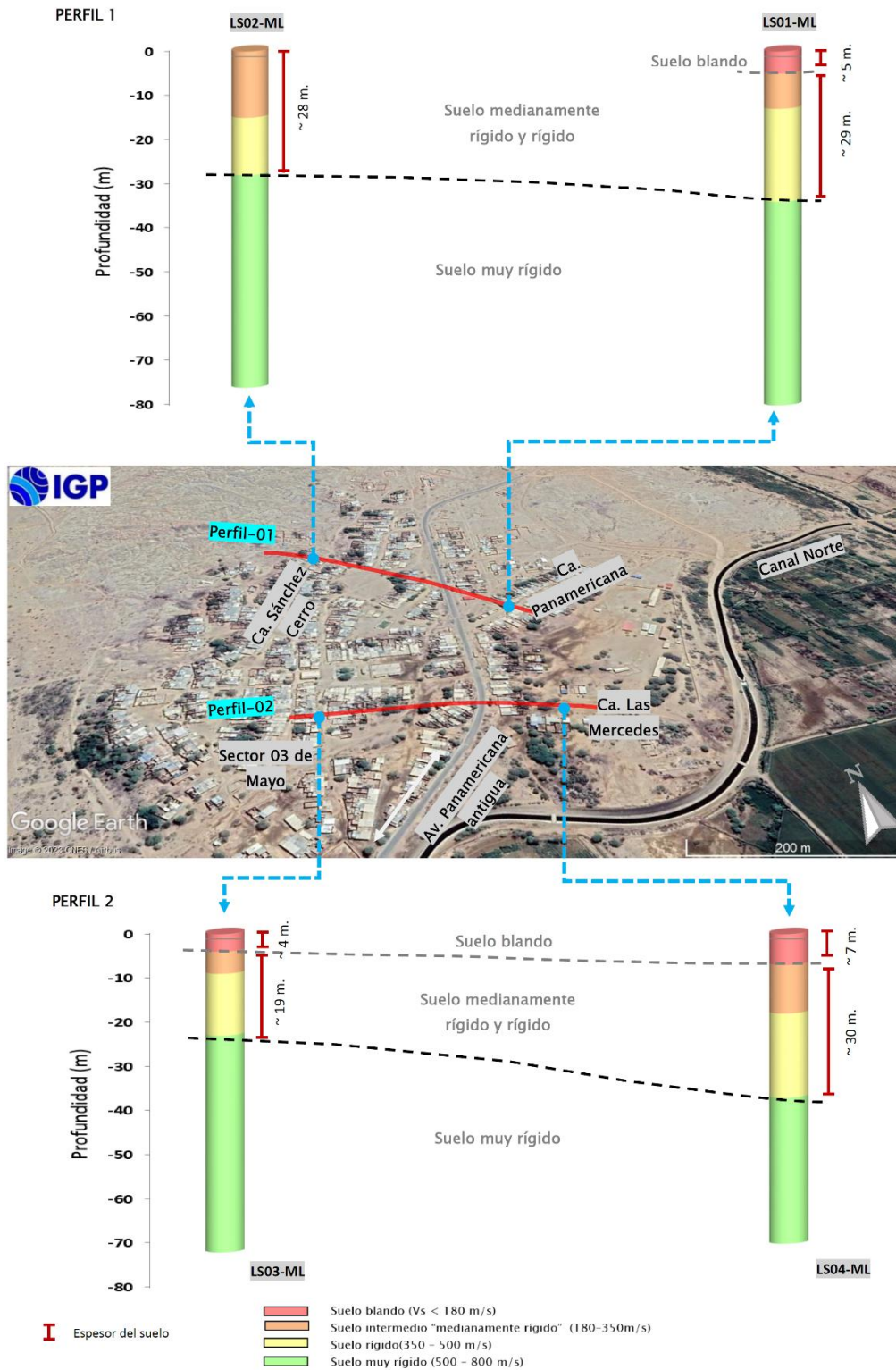


Figura 31. Resultados de MASW y MAM ubicados a lo largo del perfil 1 (LS01-ML y LS02-ML) y perfil 2 (LS03-ML y LS04-ML) sobre la imagen satelital.

- **Sección geoelectrica LE02-ML:** Realizada en la calle Sánchez Cerro sobre una longitud de 150 metros y en dirección NE-SO. En esta sección predominan los depósitos con baja resistividad (< 80 Ohm-m), espesores mayores a 40 metros. Además, en superficie se presenta tres anomalías, la primera al inicio de la sección (extremo noreste), con moderado contenido de humedad (80 a 300 Ohm-m). La segunda y tercera anomalía se encuentran en el rango de baja resistividad, pero estas presentan el menor contenido de humedad (delimitado con líneas plomas) de todo ese horizonte.

- **Sección geoelectrica LE03-ML:** Realizada en la calle 3 de Mayo sobre una longitud de 150 metros y en dirección NE-SO. En esta sección predominan los depósitos con baja resistividad (< 80 Ohm-m), espesores de hasta 40 metros. Además, se presentan dos anomalías con mayor concentración de humedad, la primera desde los 110 metros del inicio de la sección, que se extiende al suroeste y la segunda se presenta en profundidad.

En el área urbana del C.P. Monte Lima, se ha identificado la presencia de capas con suelos húmedos y/o saturados con las siguientes características:

- Hacia el norte de la plaza (calle Sánchez Cerro), se ha identificado contenido de humedad (< 80 Ohm-m), con espesores de hasta 40 metros. En superficie se ha identificado una anomalía con menor concentración de humedad, a lo largo de la sección (Figura 33).

- Hacia el oeste de la plaza, se ha identificado alto contenido de humedad (< 80 Ohm-m) con espesores mayores a 40 metros, este lugar está próximo a varias zonas de inundación pluvial (Figura 33).

- Hacia el sur de la plaza, se ha identificado alto contenido de humedad (< 80 Ohm-m) con espesores mayores a 40 metros, estos valores pueden relacionarse con la proximidad de un canal (Figura 33).

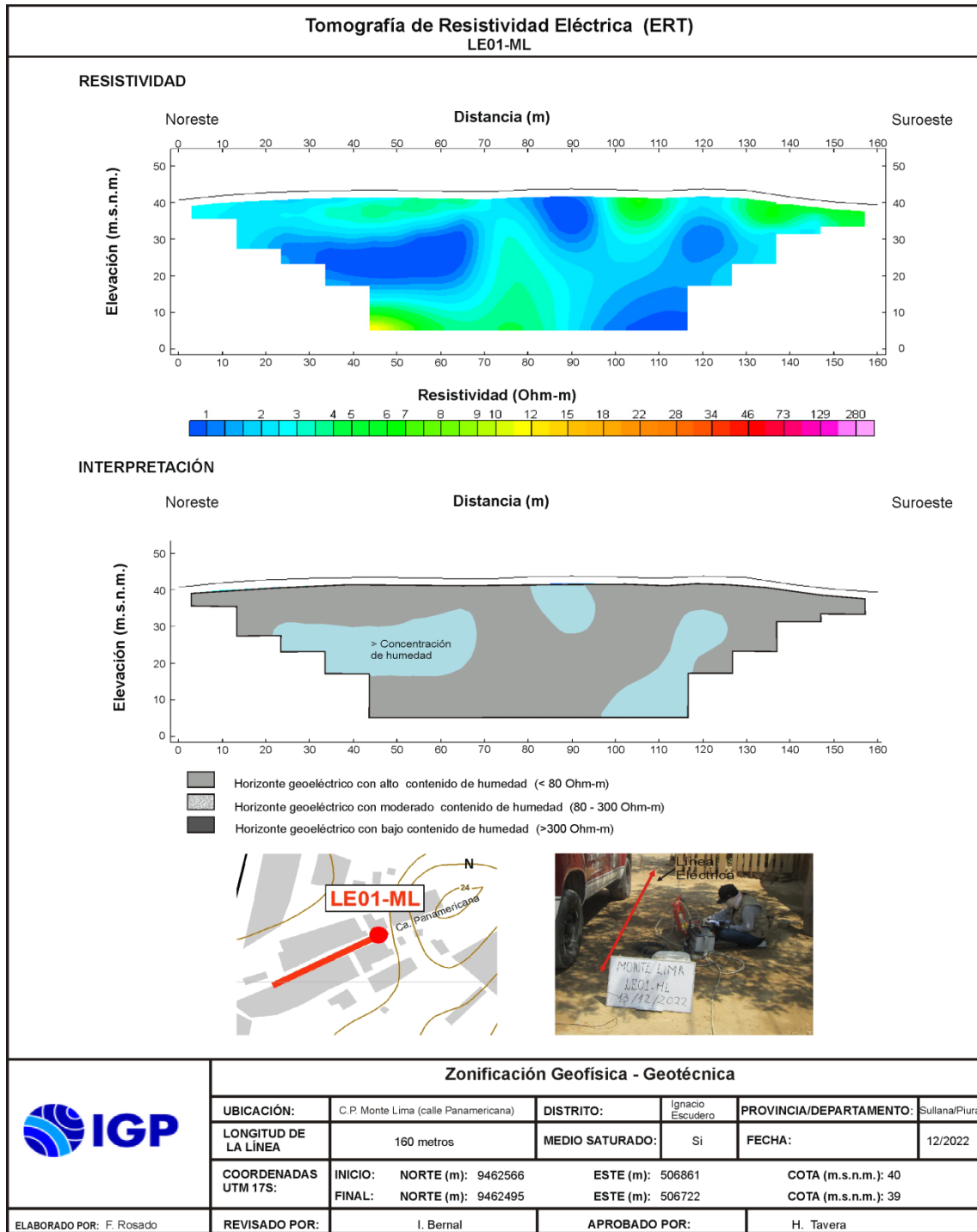


Figura 32. Resultado de tomografía eléctrica para la línea LE01-ML.

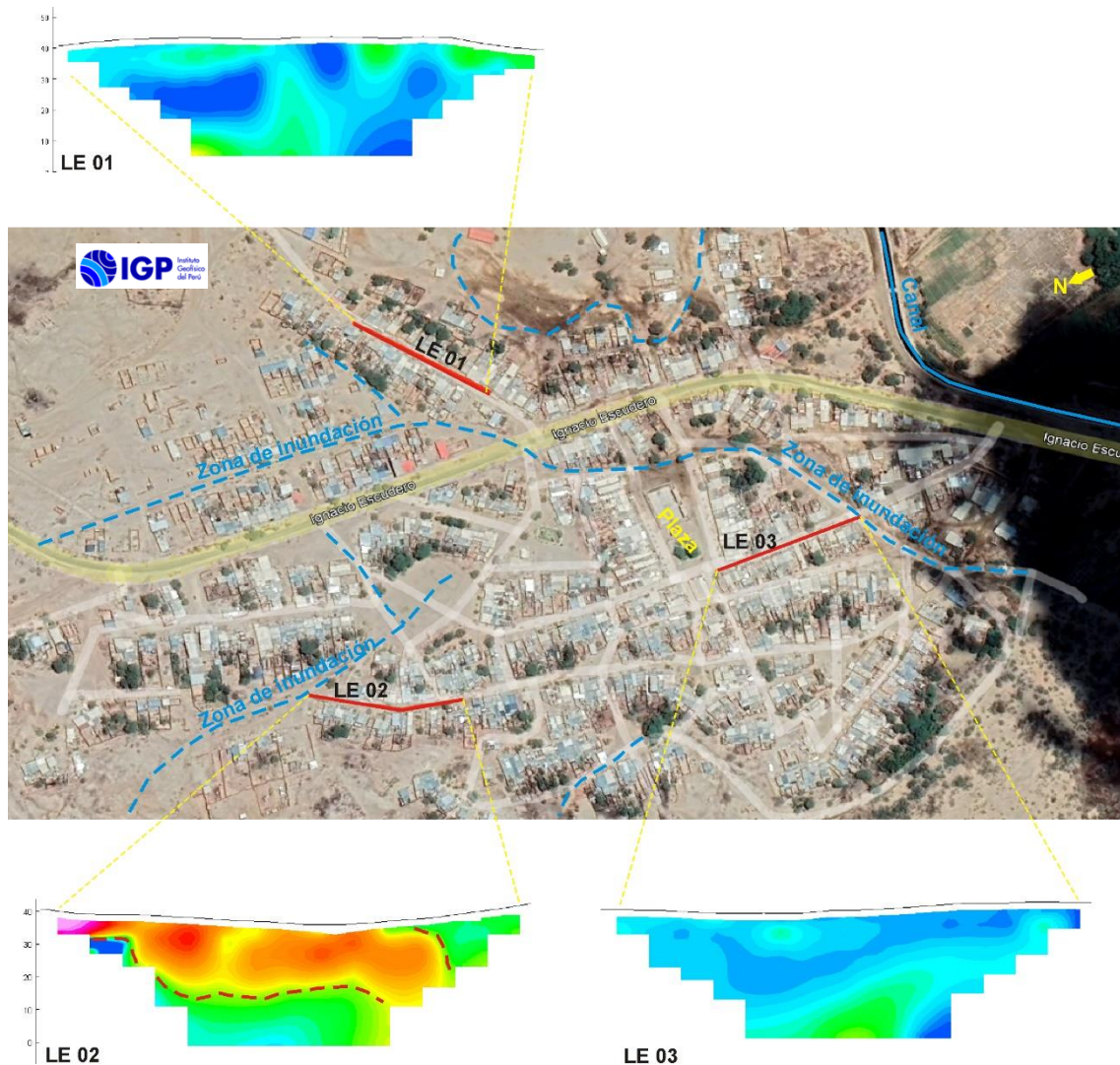


Figura 33: Ubicación y orientación de las líneas de tomografía eléctrica, realizadas LE01-ML, LE02-ML y L03-ML. Las líneas punteadas amarillas indican la orientación de las secciones y las líneas punteadas rojas indican la presencia del acuífero.

3.4. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS

El área urbana del C.P. Monte Lima se emplaza sobre una llanura aluvial plana con ligeras ondulaciones y zonas de baja pendiente que se consideran como áreas de inundación pluvial. Los parámetros físicos del suelo, muestran las siguientes características:

Los suelos del área urbana del C.P. Monte Lima responden predominantemente a periodos que fluctúan entre 0.1-0.3 segundos; así mismo, muestra sensibilidad de

manera local a un segundo rango de periodos largos (0.8-1.3 segundos) en dirección noroeste y sur del centro poblado.

Los resultados obtenidos con los métodos geofísicos permiten evidenciar que los suelos están conformados por capas superficiales de suelos medianamente rígidos a rígidos con espesores que varían de 30 metros en dirección oeste y norte, por la calle Sánchez Cerro y espesores de 34 a 37 metros en dirección este y sur por las calles Panamericana y las Mercedes y velocidades de ondas de corte V_{s30} que varía entre 283 y 369 m/s, correspondiendo a suelos Tipo S2 y S3; es decir suelos rígidos e intermedios y/o medianamente rígidos.

En el área urbana del C.P. Monte Lima, se ha identificado la presencia de capas con suelos húmedos y/o saturados hacia el norte de la plaza (calle Sánchez Cerro), con espesores de hasta 40 metros y en dirección oeste, suroeste y noreste de la plaza, estas zonas lugar está próximas a zonas de inundación pluvial (Figura 33).

Estas condiciones, evidencian que el C.P. Monte Lima se encuentra ubicada en una zona que presenta de moderado a alto peligro por sismo, debido a que sus suelos experimentarían altos niveles de sacudimiento (a periodos cortos) ante la ocurrencia de sismos, que afectarían directamente a los elementos expuestos en su superficie.

4. ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA – GEOTÉCNICA

El mapa de Zonificación geofísica - geotécnica para el C.P. Monte Lima, se elabora en función de la integración de los resultados de los estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos, delimitando zonas cuyos suelos presentan características de respuesta similares ante la ocurrencia de sismos.

Asimismo, las características dinámicas del suelo y sus propiedades mecánicas han permitido identificar en el área de estudio, de acuerdo con la adaptación de la clasificación de los perfiles de los suelos indicados en la Norma de Construcción Sismorresistente E.030, la existencia de suelos Tipo S2 y S3; es decir, suelos rígidos y medianamente rígidos que responden a periodos de 0.1 a 0.3 segundos con amplificaciones moderadas.

Para el área urbana del C.P. Monte Lima, se propone la siguiente Zonificación Geofísica-Geotécnica (Figura 34).

- ZONA I: Conformadas por suelos muy rígidos, no fueron identificados en el área de estudio.

- ZONA II: Suelos rígidos, conformado por capas de gran espesor de suelos granulares finos y arcillosos con espesores de 28 metros con velocidades de ondas Vs de 259 m/s para la capa superficial y de hasta 540 m/s a la profundidad de 30 metros. El periodo de vibración natural del suelos varía entre 0.1 a 0.2 segundos con amplificaciones relativas de hasta 2.5 veces. Se presenta un bajo contenido de humedad a nivel superficial; sin embargo, se identifica un horizonte con alto contenido de humedad a los 20 metros de profundidad. A profundidades de 1.5 metros los suelos presentan capacidad de carga admisible Muy Baja $<1.0 \text{ Kg/cm}^2$. Estas características corresponden a Suelos Tipo S2, que comprende suelos rígidos a medianamente rígidos.

- ZONA III: Suelo intermedio (medianamente rígido), conformado por capas de arenas y arcillas que varían de 5 a 7 metros con velocidades de ondas de corte Vs

de 150 a 169 m/s para la capa superficial y de hasta 450 m/s a la profundidad de 30 metros. El periodo de vibración natural del suelo varía entre 0.2 a 0.3 segundos con amplificaciones relativas de 3.5 veces. Se presenta un alto contenido de humedad en la zona, la presencia de algunos sectores con un nivel freático superficial a 2 a 5 metros de profundidad. A profundidades de 1.5 metros los suelos presentan capacidad de carga admisible muy baja $<1.0 \text{ Kg/cm}^2$. Estas características corresponden a Suelos Tipo S3, que comprende a suelos intermedios y/o medianamente rígidos.

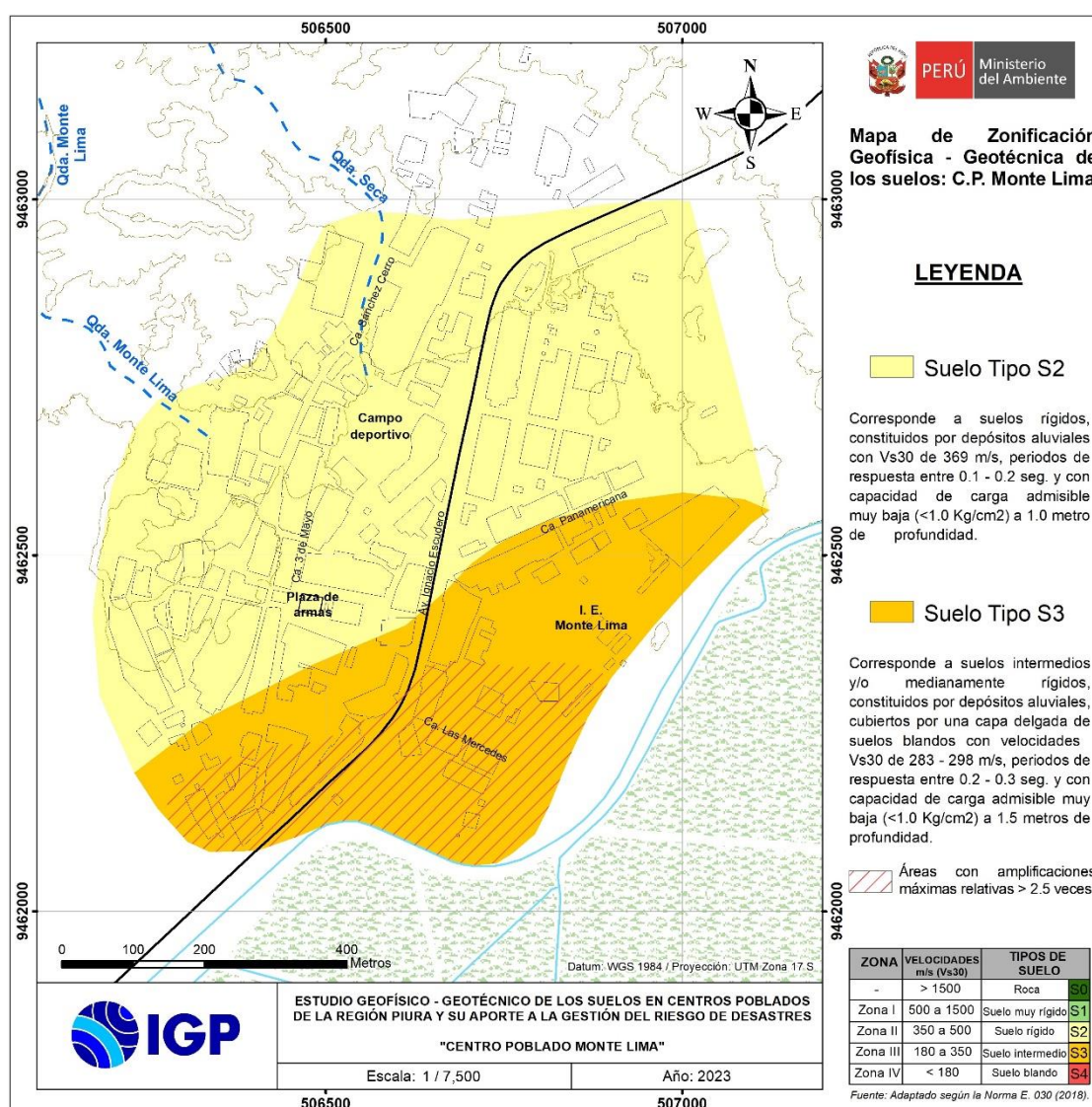


Figura 34. Mapa de zonificación geofísica-geotécnica de los suelos del C.P. Monte Lima. Las líneas inclinadas en rojo delimitan zonas con mayor amplificación.

CONCLUSIONES

El análisis y evaluación geofísica - geotécnica de los suelos del C.P. Monte Lima ubicada en el distrito de Ignacio Escudero, provincia de Sullana - Piura, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Los eventos geodinámicos identificados en el área urbana del C.P. Monte Lima, son las inundaciones pluviales, que afectan las inmediaciones de la I.E. Monte Lima, la cancha deportiva Monte Lima y la quebrada Seca que desemboca en la calle Sánchez Cerro. En estas zonas se observa la acumulación de aguas y la ausencia de drenaje pluvial.
- En el área urbana del centro poblado Monte Lima se identifican cinco tipos de suelos: limo de baja plasticidad con arena (ML) que ocupan el 26 % de toda al área de estudio; arena limosa (SM) que ocupa el 16%, arcilla de mediana plasticidad arenosa (CL) ocupan el 30 % del área de estudio, arcilla de alta plasticidad con arena (CH) ocupan el 4 % y arena arcillosa con limo (SC-SM) que ocupa el 24 %.
- Se ha determinado que para la profundidad de 1.0 y 1.5 metros, los suelos de cimentación del centro poblado Monte Lima presentan capacidad de carga admisible muy baja (menor a 1.00 kg/cm²).
- Según su comportamiento dinámico, los suelos del C.P. Monte Lima responden predominantemente a periodo de 0.1 - 0.3 segundos con amplificaciones máximas relativas de hasta 3.5 veces y de manera local a un segundo rango de periodos largos (0.8-1.3 segundos), evidenciando la presencia de suelos de moderado espesor que a nivel superficial presentan baja consistencia. Estos resultados evidencian un mayor riesgo para edificaciones y/o infraestructuras que responden en este rango de periodos, por la posibilidad de que experimenten un fenómeno de resonancia suelos-estructura.

- Los resultados permiten identificar que los suelos en el área urbana de Monte Lima están diferenciados en 4 capas sísmicas y un semi-espacio. Predominan suelos medianamente rígidos a rígidos correspondientes a la primera, segunda y hasta la tercera capa sísmica ($V_s = 245$ a 454 m/s) y con espesores entre 28 y 37 metros. En el área de estudio, se obtuvo velocidades de ondas de corte V_{s30} fluctúa entre 283 y 369 m/s, que corresponde a suelos rígidos y suelos medianamente rígidos.
- Los suelos del área de estudio presentan horizontes con alto contenido de humedad, en dirección sur, suroeste y noreste de la plaza del C.P. Monte Lima, con espesores de hasta 40 metros. Asimismo, en superficie se identifica áreas afectadas por inundaciones pluviales situadas en zonas con depresiones topográficas, afectando las viviendas aledañas a la zona de acumulación.
- Los resultados obtenidos para el área urbana de Monte Lima a partir de sus características físicas y dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo con las consideraciones indicadas en la Norma de Construcción Sismorresistente E.030 adaptada para el área de estudio, la existencia de suelos de Tipo S2 y S3; es decir, suelos intermedios (medianamente rígidos).
- A la ocurrencia de un sismo de moderada a mayor magnitud, los suelos del C.P. Monte Lima pueden experimentar niveles altos de sacudimiento, por la presencia de suelos blandos con altos niveles de humedad a nivel superficial.

REFERENCIAS

- Alfaro et al. (2014). Estimación de umbrales de precipitaciones extremas para la emisión de avisos meteorológicos, Boletín Técnico SENAMHI, pp135.
- Amézquita-Jiménez, J., Jalixto-Cuyo, R., Pampas-Quiroga, J., (2012), Teorías de capacidad de carga y sus limitaciones en suelos compresibles.
- Bernal, I., (2006), “Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, México”, Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Braja Das, (2011) - Principles of Foundation Engineering, Seven Edition, pág. 139-140.
- Gobierno Regional de Piura - Laboratorio de mecánica de suelos (2022). Estudio de mecánica de suelos con fines de cimentación para el proyecto: "Elaboración de los estudios de evaluación de riesgo de desastres - EVAR para la formulación del plan regional integral de reconstrucción ante el sismo de 30 de julio del 2021.
- Instituto Geofísico del Perú, (2021): Sismo de Sullana del 30 de julio del 2021 (M6.1) – Aspectos sismo tectónicos.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017): Directorio nacional de centros poblados. Censos nacionales 2017 XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas.
- INGEMMET, (1999), Cuadrángulo geológico de Sullana hoja 10-b.
- Louie, J. (2001). Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth From Refraction Microtremor Arrays. Bulletin of the Seismological Society of America. Pg. 20. DOI: 10.1785/0120000098
- Loke, M. (2004). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
- Nakamura Y., (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtrem or on the ground surface, Quaterly Report of the Railway Technology Research Institute, 30, 25–30.
- Norabuena, E, Dixon, T., Stein, S. (1999). Decelerating Nazca–South America and Nazca–Pacific Plate Motions

Norma Técnica de edificaciones E.030. 2018. Aprobada por resolución ministerial N°355-2018-VIVIENDA.

Norma Técnica de suelos y cimentaciones E.050. 2018. Aprobada por decreto supremo N° 011-2006-VIVIENDA.

Norma Técnica de edificaciones E.060 concreto armado 2009. Aprobada por decreto supremo N°015-2004-VIVIENDA.

Reynolds, J.M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2nd ed., 712 pp.

SESAME, (2004): Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation, European Commission – Research General Directorate Project No.EVG1-CT-2000–00026 SESAME, report D23.12.

Silgado, E. (1978): Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 3, 130 p.

Tavera, H., Agüero, C y Fernández, E. (2016). Catálogo general de isosistas para sismos peruano. Instituto Geofísico del Perú.

Terzaghi, K. Peck, B., G. & Mesri, G., (1948) – *Soil mechanics in engineering practice*, New York: Wiley

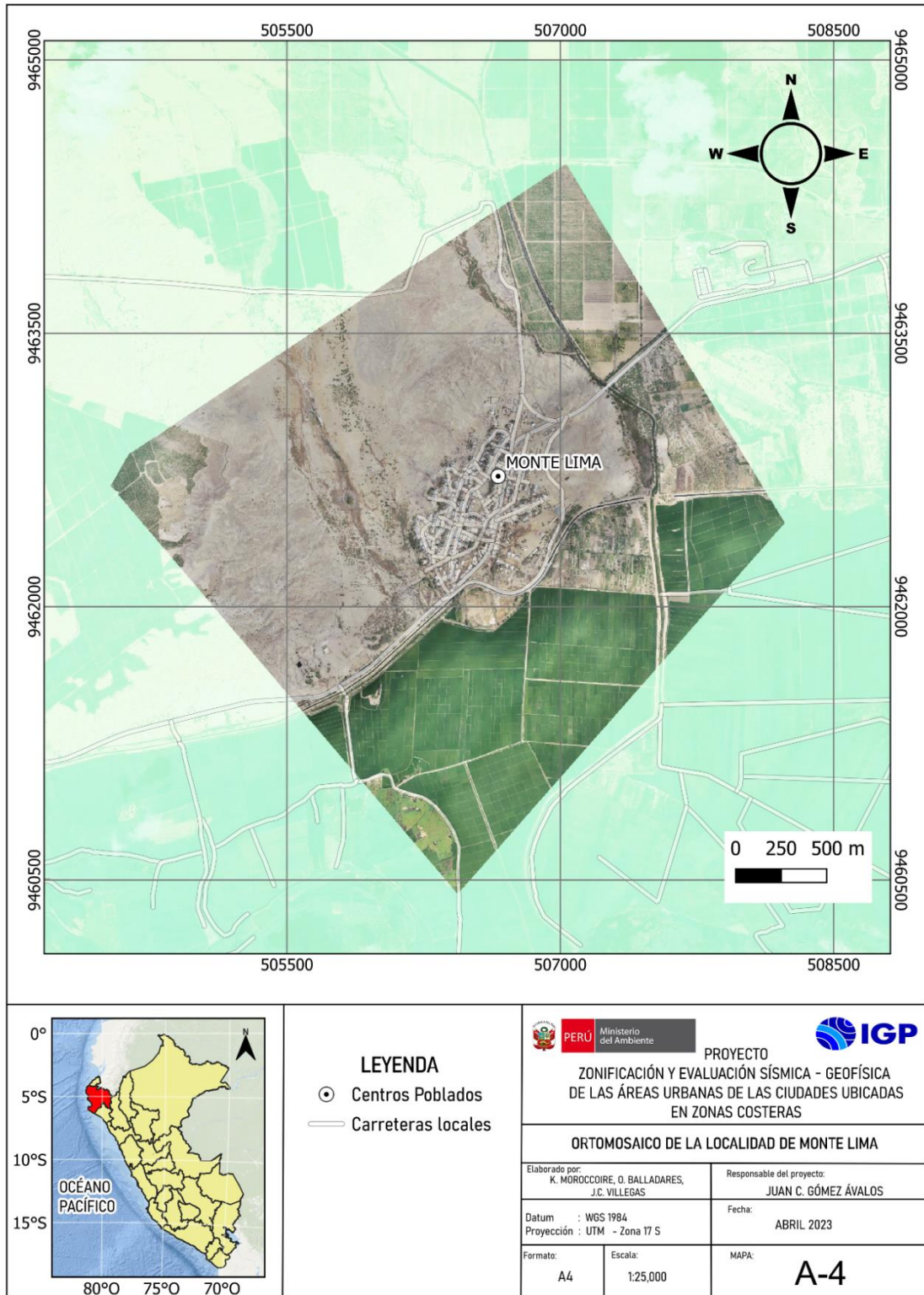
Villegas-Lanza, JC., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J., Nocquet, J-M. (2016). Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. JGR, 10.1002/2016JB013080

Villota H, (2005). *Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras*. Segunda edición.

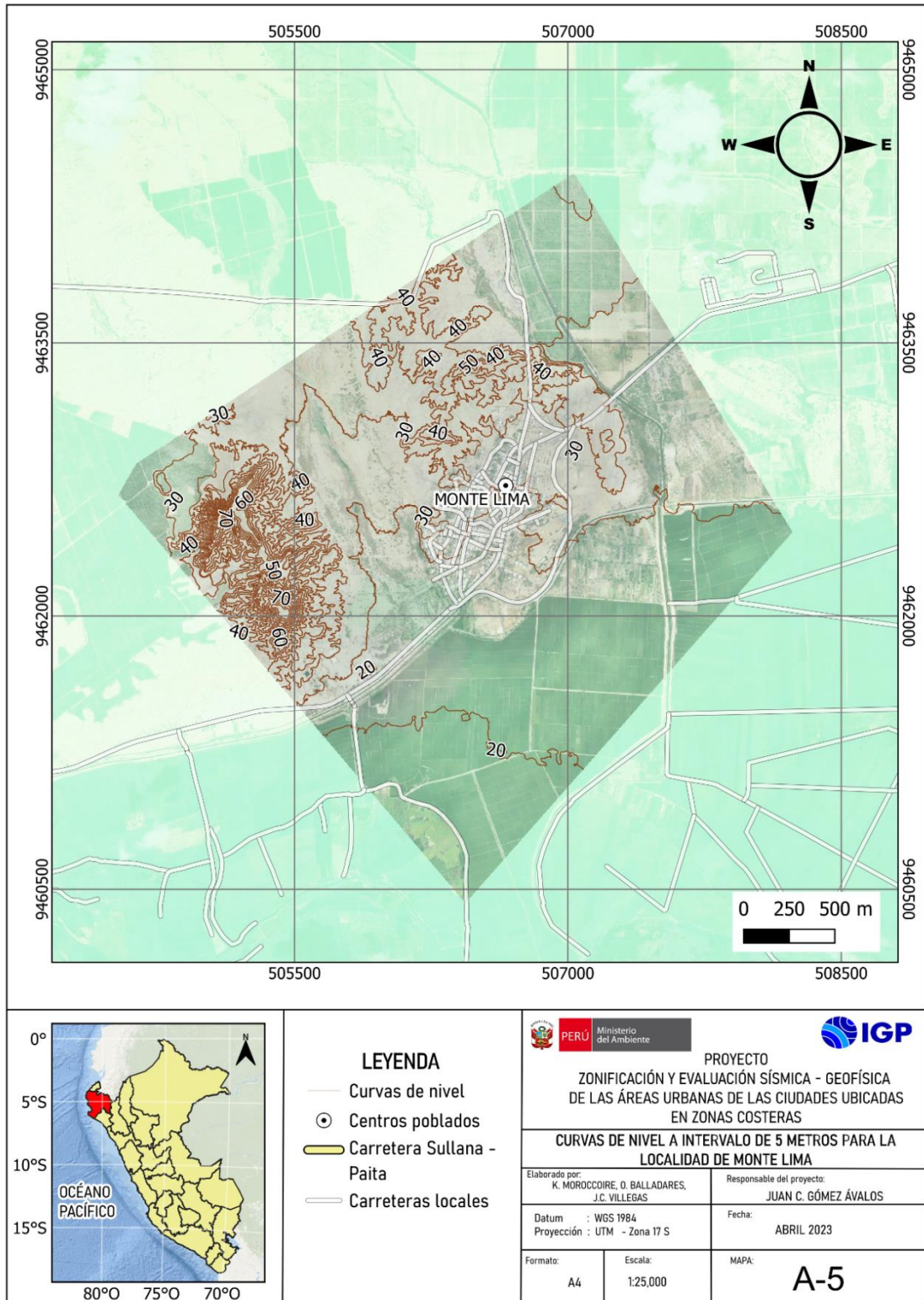
ANEXOS 1

Información topográfica

Ortomosaico

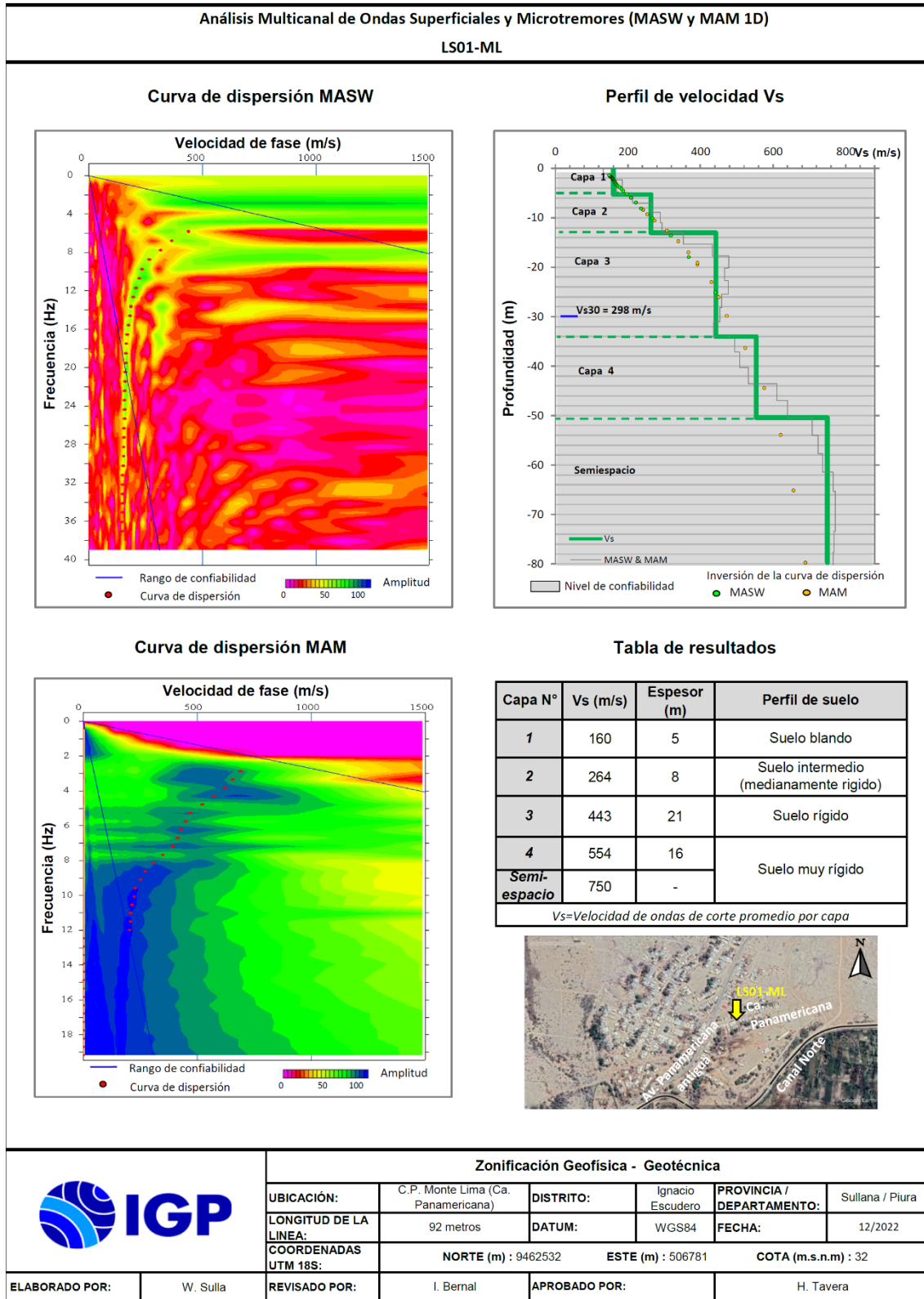


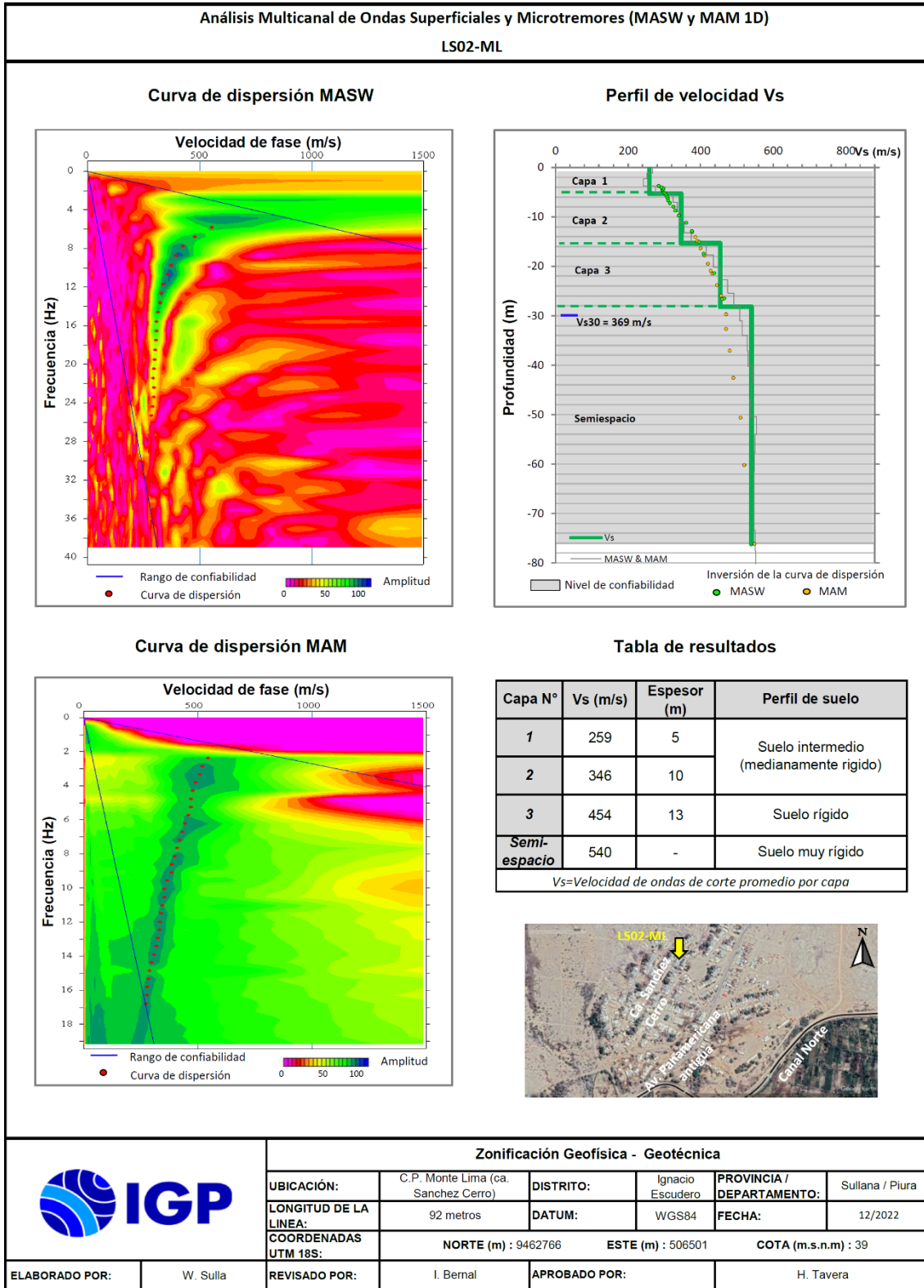
Curvas de nivel

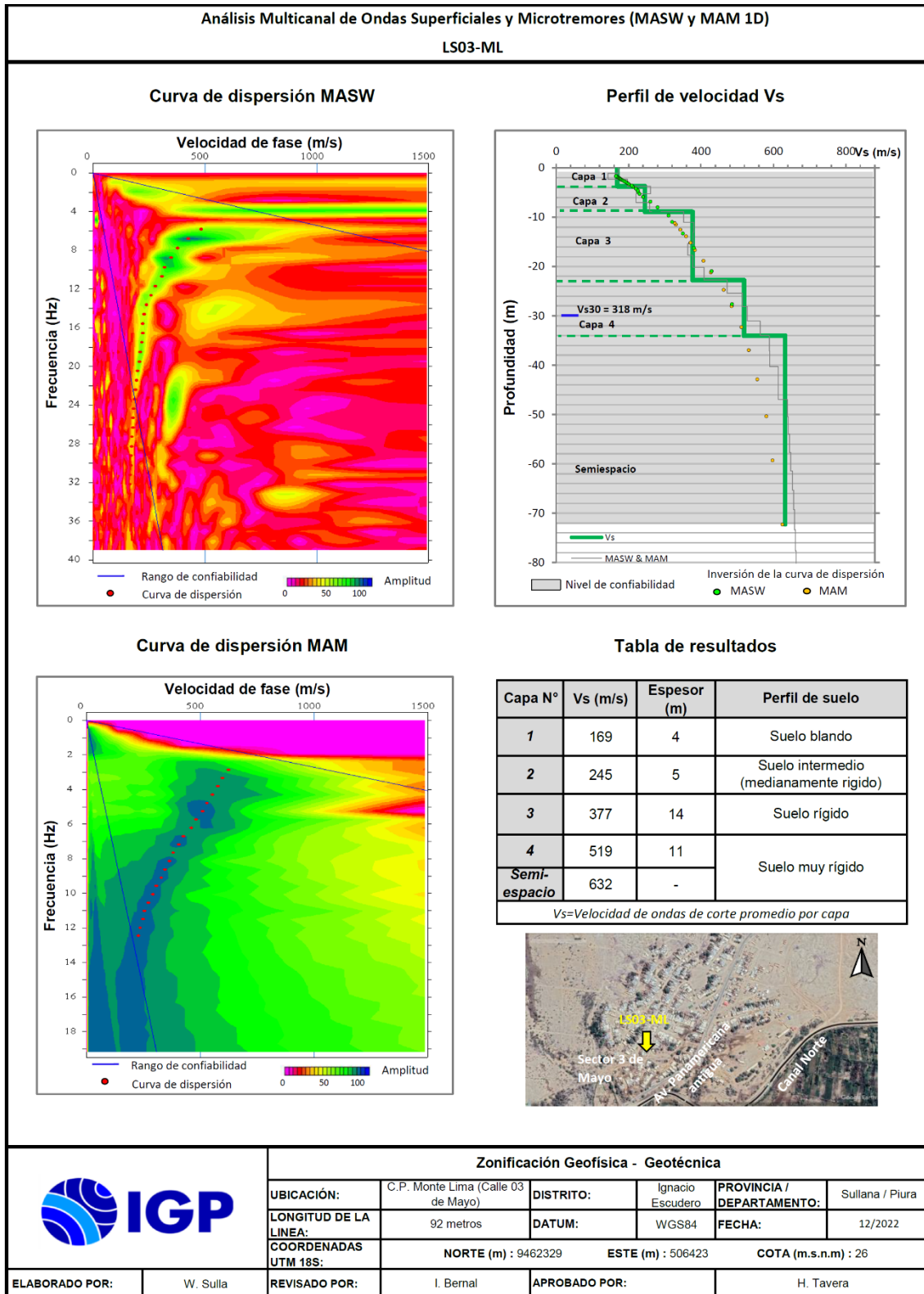


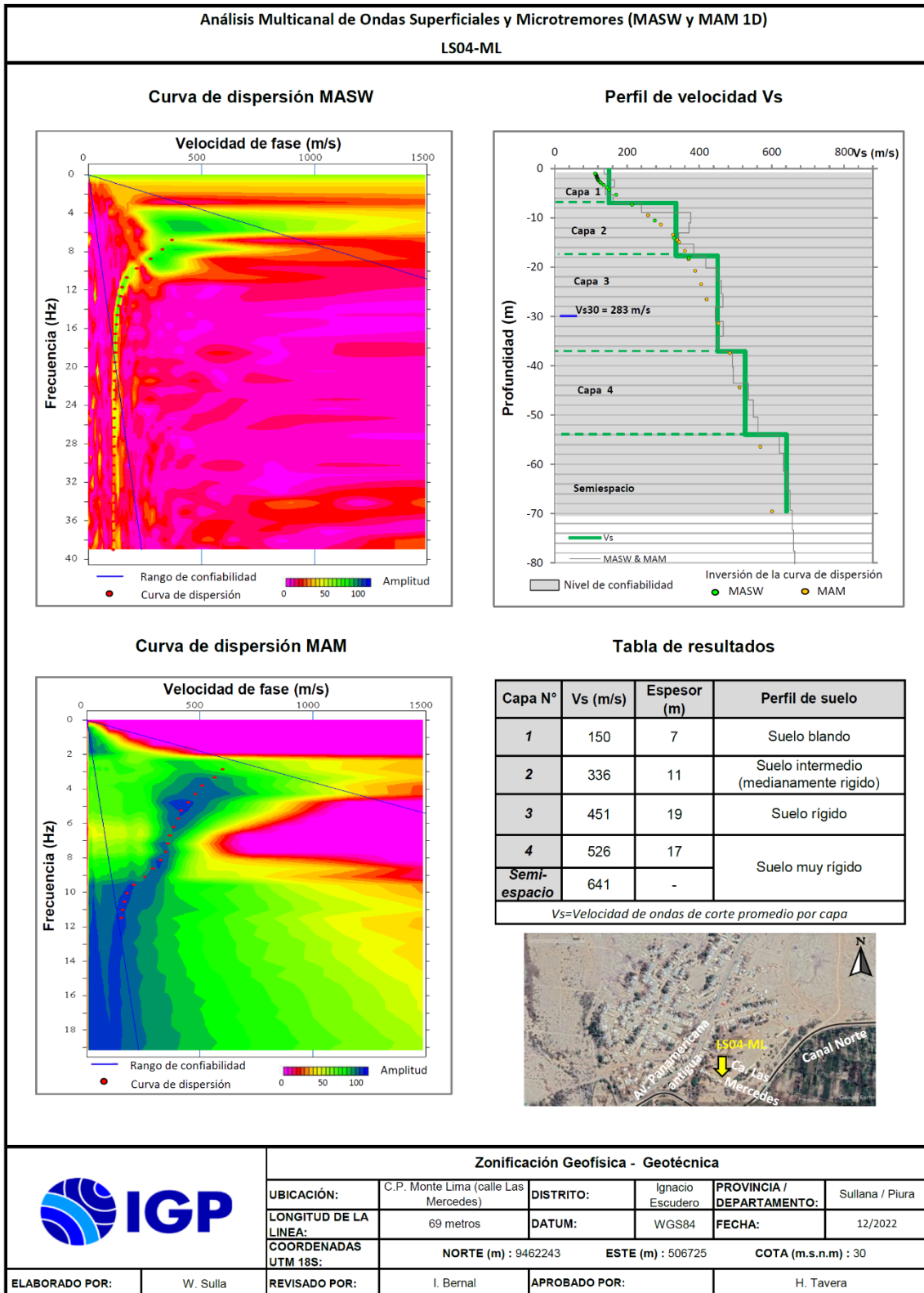
ANEXOS 2
Información Geofísica

Perfiles sísmicos MASW – MAM









Secciones de Tomografía Eléctrica

