



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



# EVALUACIÓN GEOFÍSICA DE LOS ACANTILADOS DE LA COSTA VERDE - DISTRITO DE SAN ISIDRO -

Informe Técnico N°012-2021/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima - Perú  
Mayo 2021

## **Instituto Geofísico del Perú**

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Director Ciencias de la Tierra Sólida: Juan Carlos Gómez

## **Informe Técnico**

Evaluación Geofísica de los Acantilados de la Costa Verde - Distrito de San Isidro

### **Autores**

Isabel Bernal, Hernando Tavera, Wilfredo Sullá y Jorge Salas.

### **Participantes:**

Evaluación Geofísica: Kely Pari / Wilfredo Sullá / Isabel Bernal / Fabiola Rosado / Liliana Torres / Jorge Salas / Mijael Berduzco / Juan Carlos Villegas / Javier Oyola.

Cartografía: Javier Oyola.

Geodinámica: Mariana Vivanco / Pilar Vivanco / Juan Carlos Gómez.

*Apoyo técnico: Jesús Huarachi, Manuel Medina / Evelyn Arapa / Vilma Nina / Julio Martínez / Luz Arredondo / Henry Salas.*

*Apoyo logístico: Robert Yupanqui / Augusto Cárdenas / Miguel Nizama / Marco Gonzales / Carlos Montero.*

*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

**EVALUACIÓN GEOFÍSICA  
DE LOS ACANTILADOS DE LA COSTA VERDE  
-DISTRITO DE SAN ISIDRO-**

## **RESUMEN**

En el Acantilado de la Costa Verde (ACV) del distrito de San Isidro, se ha determinado la estructura del subsuelo y su comportamiento dinámico aplicando diversos métodos geofísicos. Los resultados obtenidos muestran en promedio la existencia de tres capas de variado espesor y compuesto por materiales de diferente rigidez: a) la primera capa con espesores de 4 a 7 metros, está constituida por materiales aluviales suelto o poco consolidados ( $V_s=207-285$  m/s,  $V_p=350-578$ m/s), b) la segunda capa con espesores de 10 a 12 metros, está constituida por materiales aluviales medianamente compactos ( $V_s=421-463$  m/s,  $V_p=578-1186$  m/s) y c) la tercera capa, de ~12 metros de espesor está constituida con materiales aluviales compactos ( $V_s=553-627$  m/s,  $V_p\geq 1186$ m/s). Estos resultados coinciden con la profundidad de las interfaces a 5 y 15 metros, definidas en función de la densidad de sus materiales ( $1.6$  gr/  $cm^3$ ,  $1.9$  gr/  $cm^3$  y  $2.3$  gr/  $cm^3$ ).

Entre los parques del Malecón Godofredo García y Bicentenario, se ha identificado la presencia de suelos compuestos por materiales menos consolidados en capas que superan los 20 metros de espesor a la altura de la Calle Godofredo García; mientras que, en el extremo Este del parque de la Benemérita y Av. Pérez Aranibar, esta misma capa presenta espesores de 5 metros.

A lo largo del acantilado, se ha identificado la presencia de suelos con moderado a alto contenido de humedad con espesores que varían de 25 a 40 metros, principalmente en el sector sureste del Malecón Godofredo García. En estos sectores, existen áreas verdes con riego continuo que facilitan la presencia de asentamientos y grietas en el terreno que alcanzan los 2 metros de profundidad. Asimismo, en los parques Gandhi y Grecia, los

asentamientos y grietas presentan desniveles de 1 a 2 metros de profundidad.

El comportamiento dinámico de los suelos en los ACV del distrito de San Isidro, ha permitido definir en superficie, el límite que separa los suelos estables de los inestables. Desde el acantilado hacia el área urbana, el límite se encuentra, de noroeste (NO) a sureste (SE), a una distancia de 50 a 100 metros. Ante la ocurrencia de un sismo que genere elevados niveles de sacudimiento del suelo, las zonas con mayor riesgo son: El sector del Malecón Godofredo García frente a los parques de la Benemérita Guardia Civil, Mahatma Gandhi y Grecia, entre la calle Godofredo García y el talud de la bajada Los Delfines, hacia el extremo Oeste del Complejo deportivo municipal.

## **CONTENIDO**

### **RESUMEN**

#### **1.- INTRODUCCIÓN**

- 1.1.- Objetivos del estudio
- 1.2. Ubicación de la zona de estudio

#### **2.- METODOLOGÍA, DATOS Y RESULTADOS**

- 2.1.- Método de Refracción Sísmica
  - 2.1.1.- Adquisición de datos
  - 2.1.2.-Procesamiento y análisis
  - 2.1.3.- Resultados e interpretación
- 2.2.- Métodos MASW y MAM
  - 2.2.1.- Adquisición de datos
  - 2.2.2.-Procesamiento y análisis
  - 2.2.3.- Resultados e interpretación
- 2.3.- Método de Tomografía Eléctrica
  - 2.3.1.- Adquisición de datos
  - 2.3.2.-Procesamiento y análisis
  - 2.3.3.- Resultados e interpretación
- 2.4.- Método de Georadar
  - 2.4.1.- Adquisición de datos
  - 2.4.2.-Procesamiento y análisis
  - 2.4.3.- Resultados e interpretación
- 2.5.- Método de razones espectrales (H/V)
  - 2.5.1.- Adquisición de datos
  - 2.5.2.-Procesamiento y análisis
  - 2.5.3.- Resultados e interpretación

## 2.6.- Método de Gravimetría

2.6.1.- Adquisición de datos

2.6.2.-Procesamiento y análisis

2.6.3.- Resultados e interpretación

## 3.- CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUBSUELO Y SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO

3.1. Estructura del subsuelo

3.2. Delimitación de zonas de mayor riesgo por sismo

## CONCLUSIONES

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXO

ANEXO I. Secciones de Refracción Sísmica

ANEXO II. Perfiles MASW y MAM.

ANEXO III. Tablas con parámetros sísmicos

ANEXO IV. Secciones geeléctricas

ANEXO V. Secciones de Radargramas

## **1.- INTRODUCCIÓN**

En la costa central del Perú han ocurrido eventos sísmicos de variada magnitud que han generado altos niveles de sacudimiento del suelo, puestos en evidencia con los daños observados post-sismo en la región Lima (Silgado, 1978; Bernal et al., 2008; 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 que generen los mismos o mayores niveles de sacudimiento del suelo. De ahí la importancia de conocer la estructura del subsuelo y evaluar su comportamiento dinámico ante la incidencia de las ondas sísmicas que, de acuerdo a la composición geológica y propiedades físicas, atenuaran o amplificaran los niveles de sacudimiento del suelo.

En Lima Metropolitana, uno de los accidentes topográficos más resaltante y vulnerable ante la ocurrencia de un sismo es el Acantilado de la Costa Verde (ACV), que con una extensión de 22.5 km une a los distritos de San Miguel, Magdalena del Mar, San Isidro, Miraflores, Barranco y Chorrillos. Los ACV presentan una altura promedio de 50 metros sobre el nivel medio del mar y está conformado por una terraza fluvio-aluvional como parte del cono de deyección de los ríos Rímac y Chillón, y con presencia de cárcavas y quebradas perpendiculares al acantilado. Asimismo, en el tiempo, la parte baja de los ACV ha sido modelada por las aguas del Océano Pacífico y actualmente, por obras de ingeniería para el mantenimiento de la denominada Vía Circuito de Playas (Figura 1).

Por otro lado, desde los años 1960, los ACV han soportado el crecimiento urbano de Lima Metropolitana, siendo sus áreas próximas al acantilado invadidas por viviendas y/o complejos habitacionales, llegando en muchos casos, a ganar terrenos con el uso de materiales de relleno sobre las cárcavas y quebradas. En muchos casos, estas zonas fueron destinadas a

parques, jardines y áreas deportivas, pero en su mayoría para la construcción de edificaciones.



*Figura 1: Imagen panorámica de los ACV (Fuente: Revista Perú Construye)*

En este escenario, en los últimos 10 años los ACV han sido afectados con la ocurrencia de más de 17 deslizamientos de tierra con variados volúmenes y/o caída de rocas que han causado daños y efectos en la Vía Circuito de Playas y a sus usuarios. (Figura 2). Es debido a esto que, en el año 2019, el INDECI convocó a las entidades técnico-científicas para elaborar el “Informe Técnico Consolidado sobre los Acanilados de la Costa Verde” y en base al mismo, se declaró el Estado de Emergencia por Peligro inminente ante nuevos derrumbes en los ACV de los distritos de San Miguel, Magdalena del Mar, San Isidro, Miraflores, Barranco y Chorrillos. Luego mediante el Decreto Supremo N° 161-2019-PCM, el Estado de Emergencia fue extendido hasta la actualidad.

En febrero del año 2020, CENEPRED y la Municipalidad Metropolitana de Lima obtienen el financiamiento de FONDES para realizar los estudios antes indicados con la participación de instituciones técnicas, de investigación y de la academia. Entre estas instituciones se encuentran el

Instituto Geográfico Nacional (IGN), el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), la Universidad Nacional de Ingeniería (UNICISMID), la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) y el Instituto Geofísico del Perú (IGP). Las coordinaciones finales para la ejecución de los estudios se dieron en el mes de noviembre del 2020, siendo el IGP encargado de los estudios Geofísicos y de Peligro Sísmico.



*Figura 2. Deslizamiento ocurrido el 08 de agosto del 2019 en el ACV (Fuente Diario Gestión)*

Como parte del proyecto coordinado por CENEPRED, el IGP debe realizar trabajos de campo para la recolección in situ de datos geofísicos, para luego realizar su procesamiento e interpretación a fin de determinar la estructura del subsuelo en los ACV y su comportamiento dinámico ante la posible ocurrencia de sismos.

En este informe se presentan los resultados obtenidos del estudio geofísico realizado en los ACV del distrito de San Isidro aplicando técnicas geofísicas como refracción sísmica (RS), análisis multicanal de las ondas superficiales (MASW) y el análisis multicanal de microtremores(MAM) para

identificar espesores de capas y velocidades de ondas a diferentes niveles de profundidad; tomografía eléctrica (ERT) para conocer el contenido de humedad de los suelos; georadar para definir la presencia de estructuras superficiales como grietas; razones espectrales (H/V), para conocer el periodo de respuesta del suelo y estimar su factor de amplificación ante la ocurrencia sísmica y gravimetría, para definir la interface de los estratos a diferentes profundidades en función de la densidad de los materiales presentes en el subsuelo.

### **1.1.-Objetivos del estudio**

El objetivo del presente estudio es conocer la estructura del subsuelo en los ACV del distrito de San Isidro, así como evaluar su comportamiento dinámico a partir de la aplicación de diferentes métodos geofísicos (sísmica, eléctrica, gravimetría, razones espectrales y georadar). Asimismo, determinar en superficie, el límite que separa los suelos estables de los inestables y que ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, se producirían asentamientos y deslizamientos de variado volumen.

### **1.2. Ubicación de la zona de estudio**

Los Acantilados de la Costa Verde (ACV) se encuentran ubicados en el litoral costero de Lima Metropolitana, al extremo suroeste de la provincia de Lima y el Callao, comprendiendo los distritos de San Miguel, Magdalena del Mar, San Isidro, Miraflores, Barranco y Chorrillos. A lo largo de estos distritos los ACV tiene una longitud de 22.5 km, separados de la zona de playas por alturas promedios de 40 a 70 metros (siendo mayor en Miraflores) y pendientes mayores a 50°, principalmente en los distritos de Magdalena del Mar, San Isidro y Miraflores.

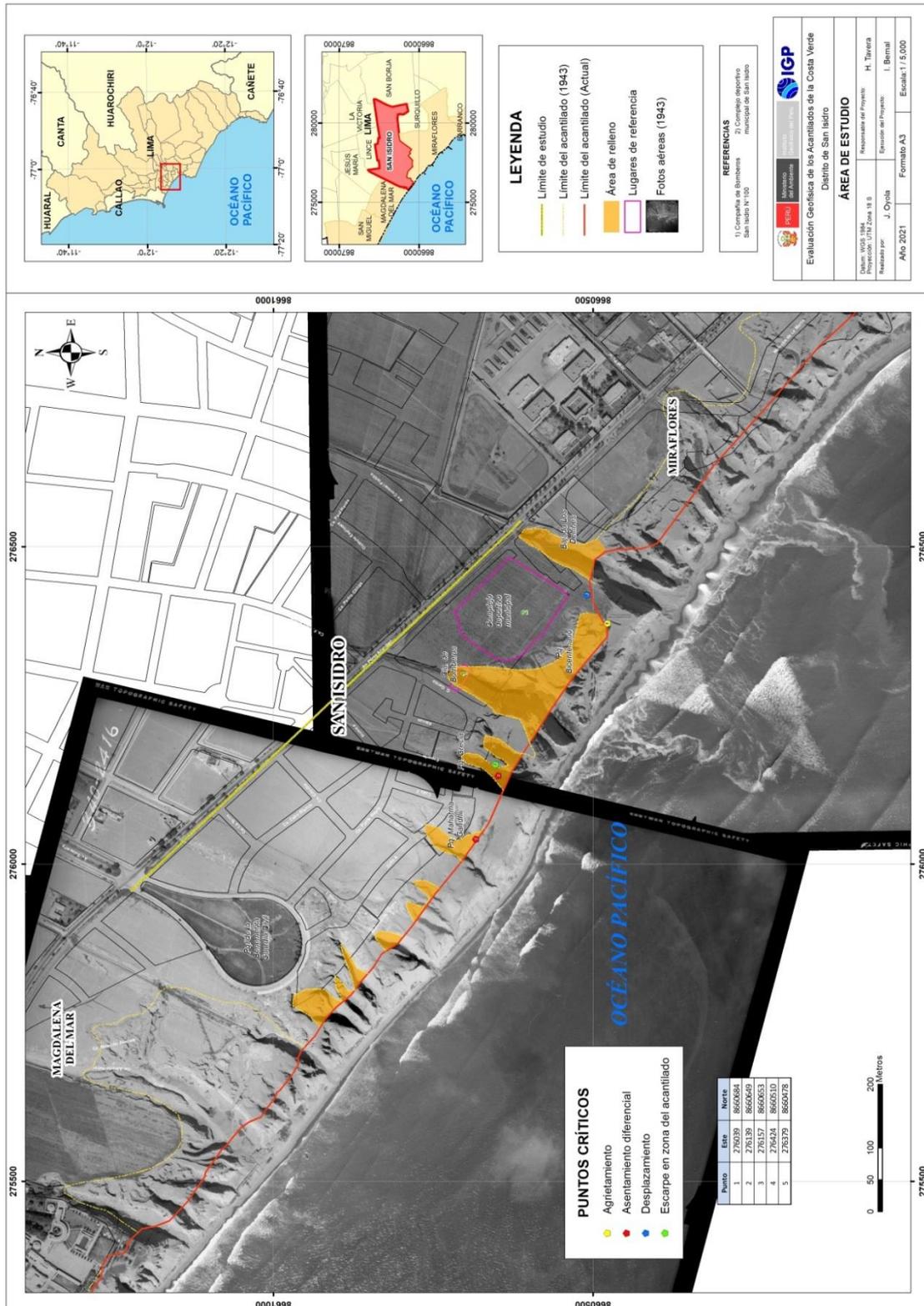


Figura 3. Mapa del área de estudio. La interlineada de color naranja indica el límite del acantilado en el año 1943 y la línea roja, el límite actual. Asimismo, se indica la ubicación de los puntos críticos identificados en el área de estudio como cárcavas, áreas de relleno, depósitos antrópicos, grietas, asentamientos y desplazamientos.

En el distrito de San Isidro, los ACV tienen una longitud de 1.2 km y alturas entre 40 a 50 metros con una inclinación de 80° a 85°. En la Figura 3, se presenta el mapa con la delimitación del área de estudio a escala 1:5,000 y sobre ella, con interlinea de color naranja se muestra el límite del acantilado en el año 1943 y con línea roja, el límite actual, observándose claramente que muchas áreas fueron urbanizadas. Asimismo, sobre el mapa se indica la ubicación de los puntos críticos identificados en superficie, tal es el caso de cárcavas, áreas de relleno, depósitos antrópicos, grietas, asentamientos y desplazamientos de tierra y piedras.

## **2.- METODOLOGÍA, DATOS Y RESULTADOS**

Las características y propiedades físicas del subsuelo dependen de los materiales que lo conforman en sus diferentes capas y que pueden ser conocidas a través de la geología, estratigrafía y geomorfología. Sin embargo, su comportamiento dinámico está asociado a la ocurrencia de sismos, lluvias, movimientos de masa, entre otros, y puede ser conocida usando métodos geofísicos. En general, estos métodos permitirán, a partir del análisis e interpretación de los datos obtenidos directamente en el campo usando instrumentación especializada, conocer los espesores de las capas del subsuelo a gran profundidad, su composición, rigidez, contenido de humedad y en conjunto, su comportamiento dinámico ante la sollicitación sísmica. Por ejemplo, los suelos blandos compuestos por sedimentos saturados de agua o rellenos antrópicos, son susceptibles a generar deslizamientos ante la ocurrencia de sismos y/o fuerzas de gravedad.

Según la información geológica, los suelos en los ACV en el distrito de San Isidro, están conformados por depósitos aluviales provenientes del río Rímac; es decir, gravas (bolonería) soportadas en una matriz areno limosa y lentes de materiales finos de arcilla limosa (Figura 4a). Asimismo, en los ACV se ha identificado la presencia de áreas rellenas con material alóctono (rellenos antrópicos) hasta alcanzar en la actualidad, una altura promedio de 60 metros sobre el nivel medio de la Vía Circuito de Playas. El trabajo de campo realizado a pocos metros del acantilado, como parte del presente estudio, ha mostrado en la morfología del acantilado, la presencia de asentamientos diferenciales del suelo, así como la presencia de grietas de longitudes variables, las cuales han generado la formación de fisuras en algunas paredes de viviendas y en el pavimento del suelo (Figura 4b).



*Figura 4: a) Vista de la estratigrafía de los ACV en el distrito de San Isidro. Obsérvese la presencia de depósitos aluviales, grabas sub redondeadas con intercalaciones de lentes de finos.*



*Figura 4. b) Asentamientos del suelo y grietas en los ACV, en el Malecón Godofredo García, distrito de San Isidro.*

## **2.1.- Método de Refracción Sísmica**

El método de Refracción Sísmica (RS) permite conocer parámetros físicos de los suelos como su espesor y rigidez en base al contraste de velocidades por efectos de la propagación de las ondas sísmicas de compresión "P" en el subsuelo. Básicamente, la RS consiste en generar ondas sísmicas a partir de una fuente artificial (martillo) y medir el tiempo requerido por las ondas para viajar en el subsuelo desde la fuente hacia una serie de geófonos, usualmente dispuestos en línea recta.

### **2.1.1.- Adquisición de datos**

Para la aplicación del método de RS se ha utilizado un equipo sísmico de uso multipropósito, modelo GEODE de 24 sensores o geófonos de alta frecuencia (14 Hz). Como fuente de impacto y/o energía para generar las ondas sísmicas, se utilizó un martillo de 20 lbs, tal como muestra la Figura 5. Para este método se ha considerado tendidos lineales de hasta 335 metros de longitud y con geófonos espaciados cada 5 metros y frecuencia de muestreo de 4000 Hz (0.25 ms). La ubicación de cada RS fue variable ya que dependió de la geomorfología de la zona de estudio y su accesibilidad.

En el distrito de San Isidro se realizaron, durante la noche 02 líneas de RS con longitudes de hasta 335 metros y durante el día, 03 líneas con longitudes de 138 y 92 metros (Tabla 1). La distribución espacial de estas líneas debidamente codificadas se muestra en la Figura 6. Durante la toma de datos RS, el operador evaluaba la calidad de los datos conforme eran adquiridos, indicando repeticiones, cambio de fuentes de energía o posición del equipo, según sea conveniente o necesario para obtener datos geofísicos de calidad.

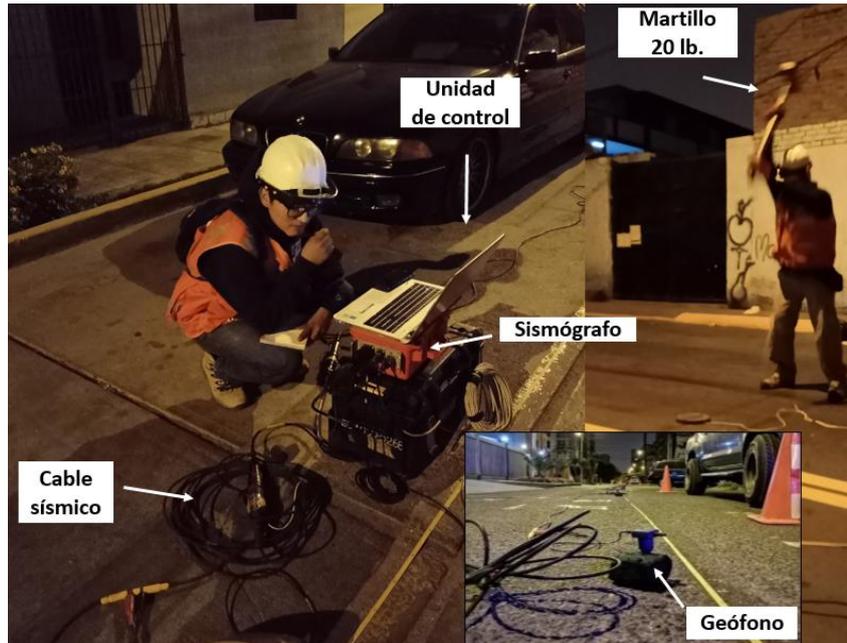


Figura 5. Equipos utilizados en la adquisición de datos de RS.

Tabla 1: 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)			
RS					
RS01-SI	276136	8660629	57	5	335
	276345	8660894	66		
RS02-SI	275966	8660761	61	6	138
	276062	8660677	61		
RS03-SI	276255	8660563	60	6	138
	276355	8660478	60		
RS03-MG	275808	8660892	60	5	335
	275959	8661210	62		
RS09-MG	275786	8660923	61	4	92
	275859	8660861	60		

La distribución de los ensayos sísmicos de RS fue en función de las zonas de interés de acuerdo al reconocimiento hecho en fotos aéreas antiguas del acantilado, investigaciones o estudios previos, así como la disponibilidad del espacio y las facilidades para el despliegue de los equipos geofísicos a utilizarse.

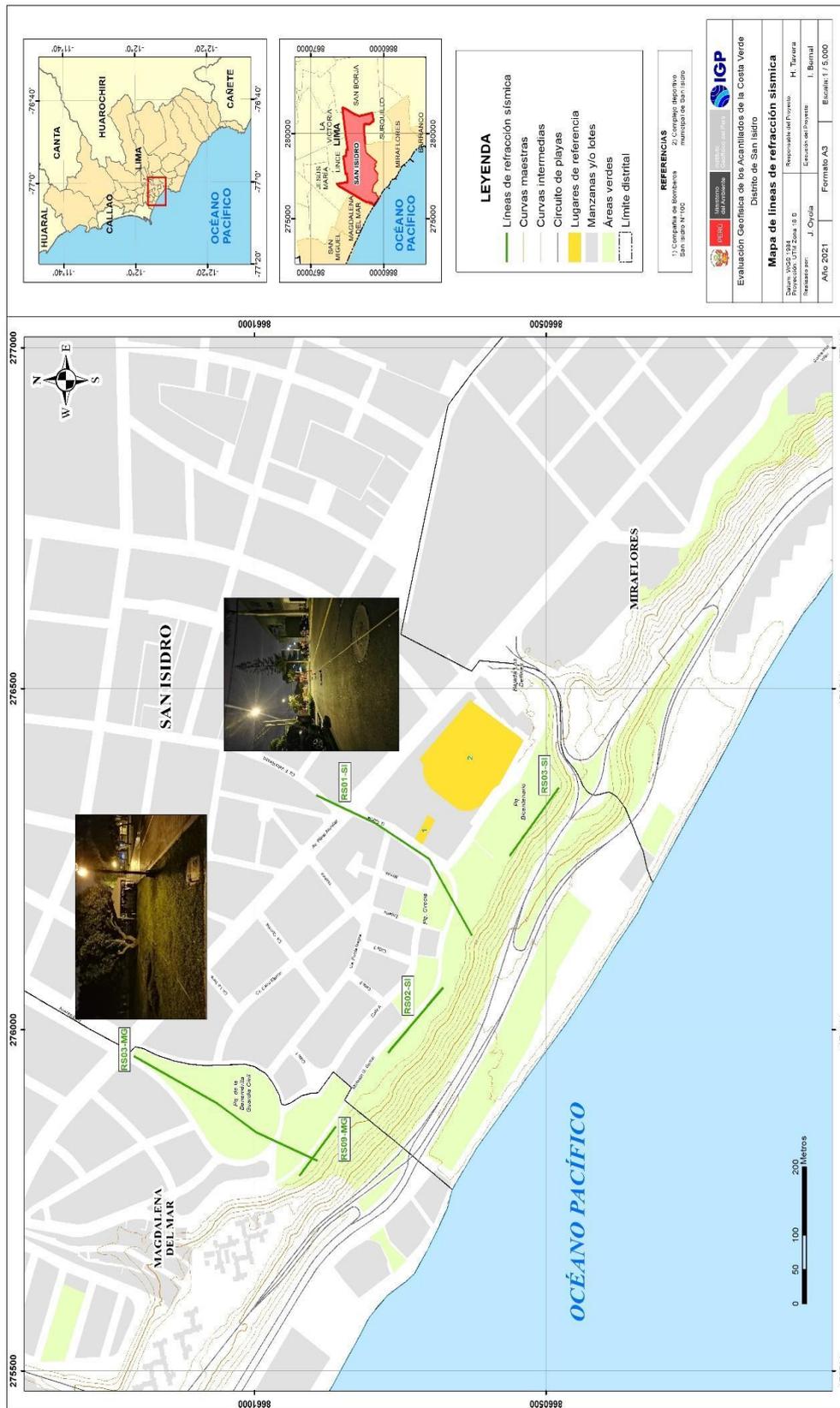


Figura 6. Distribución espacial de las líneas de RS, codificadas como RS01-SI, RS02-SI, RS03-SI, RS03-MG y RS09-MG.

En la Figura 7, se muestra como ejemplo la línea sísmica RS01-SI que se inicia en el Malecón Godofredo García en dirección a la calle del mismo nombre. El sismograma contiene las señales sísmicas con presencia de bajo ruido ambiental, lo cual indica la buena calidad de los datos.



Figura 7. Disposición del equipo de adquisición de datos con la técnica de refracción sísmica (RS01-SI, calle Godofredo García) y registro sísmico obtenido.

### 2.1.2.- Procesamiento y análisis

El procesamiento de los datos fue realizado con el programa SeisImager y se inició con el picado de los primeros arribos de la onda P en el registro, formando de esta manera curvas tiempo vs distancia (dromocronas), que después de un proceso de inversión permite obtenerse la sección de RS respectiva. En la Figura 8, se muestra un ejemplo de curvas tiempo vs distancia para la línea sísmica RS01-SI.

Para el análisis de los resultados e identificación del tipo de suelo en base a las velocidades de las ondas de volumen ( $V_p$ ), se considera los valores propuestos por la ASTM-D5777, ver Tabla 2.

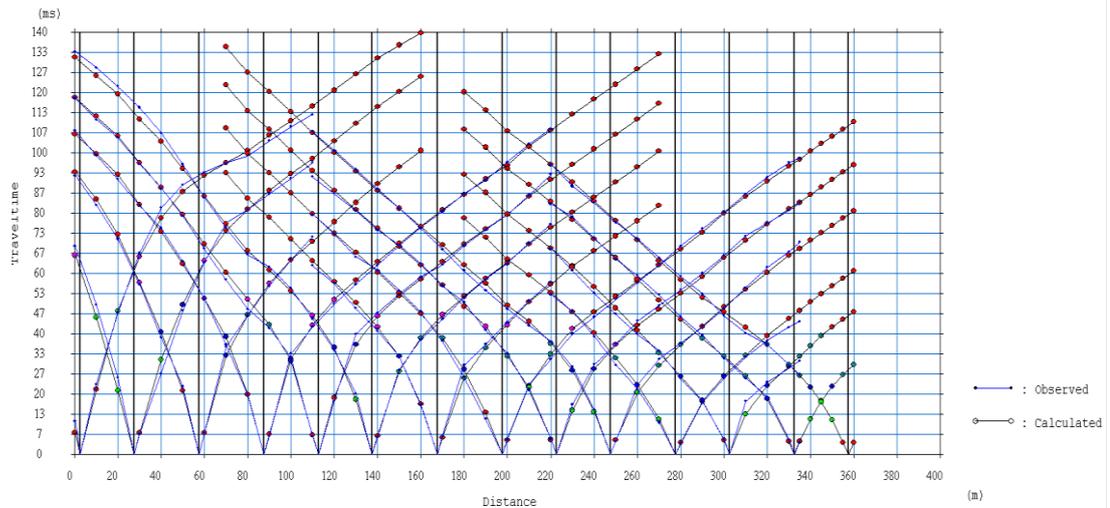


Figura 8. Curvas de tiempo - distancia obtenidas para la línea sísmica RS01-SI.

Tabla 2: Clasificación de perfiles de suelo según la ASTM-D5777.

ASTM - D5777	
Velocidad Vp (m/s)	Descripción
240 - 610	Suelo intemperizado
460 - 915	Grava o arena seca
1830 - 1220	Arena saturada
910 - 2750	Arcilla saturada
1430 - 1665	Agua
1460 - 1525	Agua de mar
1830 - 3960	Arenisca
2750 - 4270	Esquisto, arcilla esquistosa
1830 - 3960	Tiza
2134 - 6100	Caliza
4575 - 5800	Granito
3050 - 7000	Roca metamórfica

### 2.1.3.- Resultados e interpretación

#### a) Resultados

En el área de estudio se realizaron 05 líneas de RS, de las cuales 02 presentan resolución hasta una profundidad de 50 metros (RS01-SI y RS03-MG) y el resto hasta los 30 metros. En la Figura 9, se presenta la sección de RS obtenida para la línea RS01-SI y en el Anexo I, las líneas restantes, siendo sus características las siguientes:

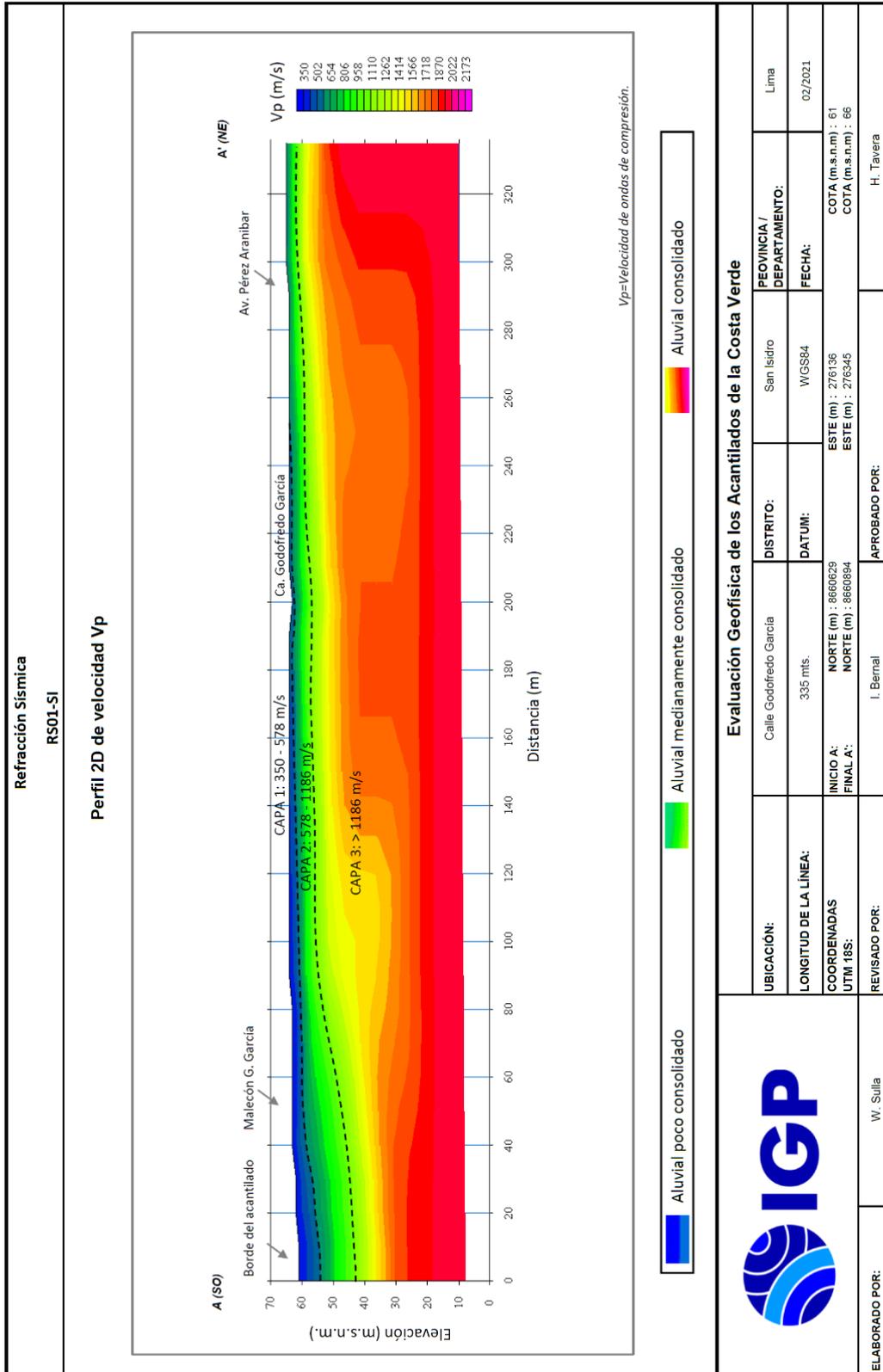


Figura 9. Resultados obtenidos con el método de refracción sísmica para la línea RS01-SI.

**Sección sísmica RS01-SI:** Línea sísmica realizada en la calle Godofredo García y los resultados obtenidos han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 3 capas con las siguientes características:

Capa	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	1 – 7	350 – 578	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	4 – 12	578–1186	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1186	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

**Sección sísmica RS02-SI:** Línea sísmica realizada en el Malecón Godofredo García, a la altura del parque Mahatma Gandhi y los resultados obtenidos han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 3 capas con las siguientes características:

Capa	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	3 – 6	350 – 578	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	8 – 15	578–1186	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1186	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

**Sección sísmica RS03-SI:** Línea sísmica realizada en el parque Bicentenario, a la altura del parque Bicentenario y los resultados obtenidos han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 3 capas con las siguientes características:

Capa	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	4 – 7	350 – 578	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	9 – 15	578–1186	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1186	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

**Sección sísmica RS03-MG:** Línea sísmica realizada en el parque de la Benemérita Guardia Civil y los resultados obtenidos han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 3 capas con las siguientes características:

Capa	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	1- 4	350-578	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	4-13	578-1186	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	>1186	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

**Línea sísmica RS09-MG:** Línea sísmica realizada en el Malecón Godofredo García, a la altura del parque de la Benemérita Guardia Civil y los resultados obtenidos han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 3 capas con las siguientes características:

Capa	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	6- 8	350-578	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	12-14	578-1186	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	>1186	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

## b) Interpretación

Las dos secciones sísmicas RS de mayor longitud se inician en el borde del acantilado (RS01-SI y RS03-MG) y se extiende en dirección noreste (área urbana), y las tres restantes se realizaron paralelas al acantilado.

En las secciones, los suelos menos consistentes y de mayor espesor (aluviales poco a medianamente consolidados) están presentes en las proximidades del borde del acantilado. Estos suelos presentan espesores de hasta 20 metros distribuidos por el Malecón Godofredo García, ver Figura 10.

En general, las secciones paralelas al acantilado (análisis horizontal), muestran que los suelos menos consolidados presentan espesores que varían entre 15 y 20 metros a lo largo del acantilado.

## **2.2.- Métodos sísmicos MASW y MAM**

El ensayo de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto; es decir, 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 generadas 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 otro método para conocer la estructura del subsuelo a partir de la velocidad de ondas de corte, pero en este caso se hace uso del registro de ruido sísmico (vibración generada por la actividad humana), cuya contribución es principalmente en bajas frecuencias, lo que permite investigar a mayores profundidades. La combinación de los métodos MASW y MAM permite obtener información de subsuelo a niveles superficiales y en profundidad.

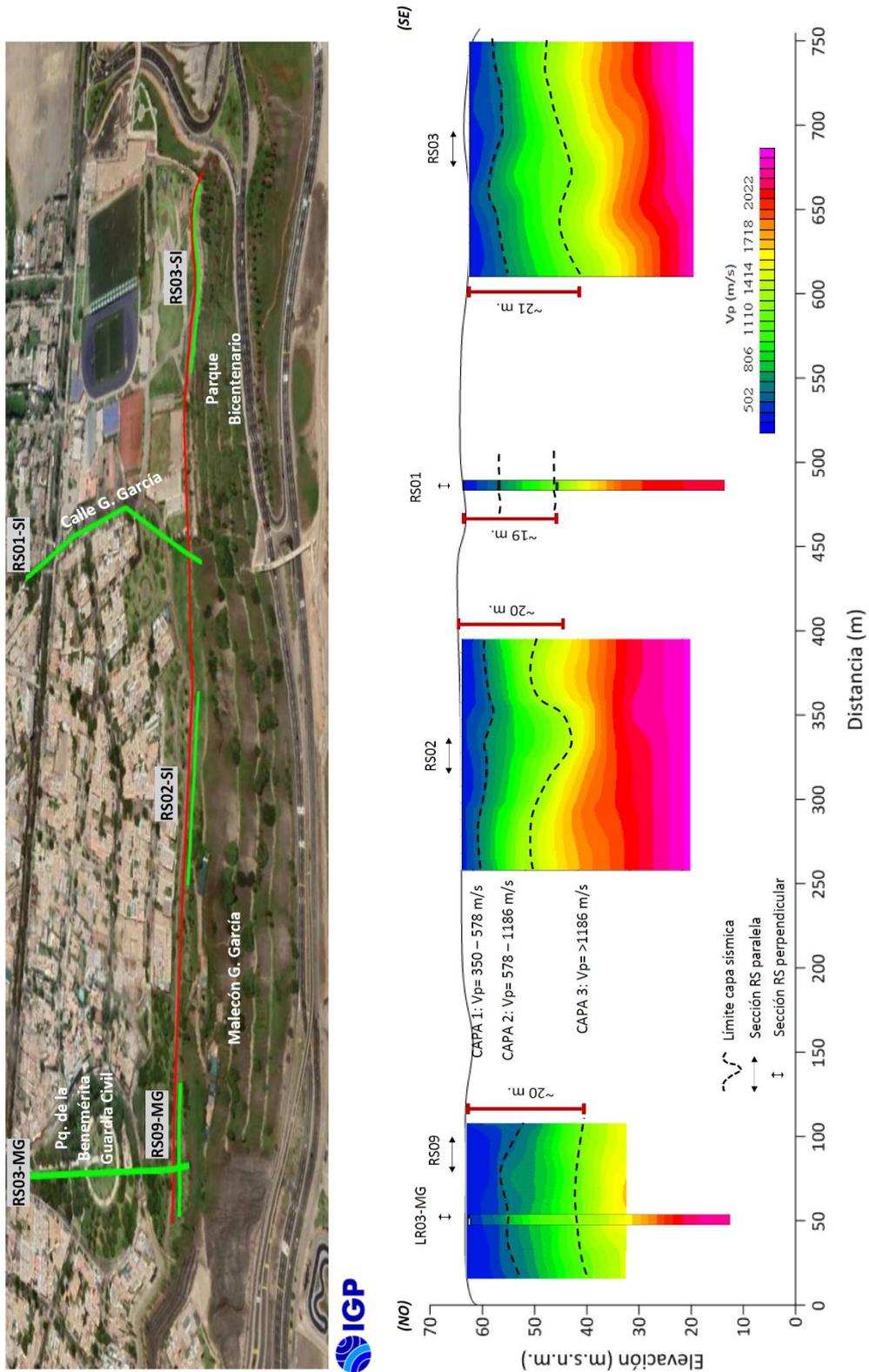


Figura 10. Correlación de los resultados obtenidos en cada sección de refracción sísmica e identificación de la estructura del subsuelo en los ACV del distrito de San Isidro.

### 2.2.1.- Adquisición de datos

Para el registro de señales sísmicas con la técnica MASW y MAM se ha utilizado un equipo sísmico de uso multipropósito, modelo GEODE de 24 sensores o geófonos de baja frecuencia (4.5 Hz). Para la técnica MASW se usó como fuente de impacto y/o energía para generar las ondas sísmicas, un martillo de 20 lbs (Figura 11). Los parámetros de registro, la geometría del tendido y espaciamiento entre geófonos fueron variables, ya que dependió de la geomorfología de la zona de estudio y accesibilidad. La frecuencia de muestreo fue de 4000 Hz (0.25 ms) para una longitud de registro de 2 segundos.



Figura 11. Equipos utilizados en la toma de datos por el método de MASW.

En el distrito de San Isidro se realizaron 8 arreglos lineales MASW y MAM, y cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 3 y en la Figura 12, su distribución espacial en el área de estudio.

Tabla 3: Coordenadas y características de las líneas sísmicas MASW y MAM.

Línea Sísmica	Coordenadas UTM – WGS84		Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total (m)
	Este (m)	Norte (m)			
MASW y MAM					
LS01-SI	276265	8660896	65	4	92
LS02-SI	276012	8660726	62	6	138
LS03-SI	275925	8660590	13	4	92
LS04-SI	276305	8660521	60	6	138
LS05-SI	276270	8660722	64	3	69
LS06-SI	276255	8660645	64	3	66
LS05-MG	275937	8661097	59	6	138
LS06-MG	275826	8660889	81	4	92

Durante todo el proceso de adquisición de datos con la técnica MASW, las señales registradas fueron analizadas a fin de evaluar sus niveles de ruido y de ser necesario, repetir el proceso. Para mejorar la relación señal/ruido se realizó el apilamiento de las señales registradas (sumatoria de registros sísmicos) y generadas por más de cuatro golpes en cada punto (shot).

En la Figura 13, se muestra la disposición del equipo sísmico en la calle Godofredo García y el registro sísmico obtenido con el método MASW. El sismograma contiene las señales sísmicas con presencia de bajo ruido ambiental y el punto de golpe a una distancia de 4 metros al final de la línea sísmica.

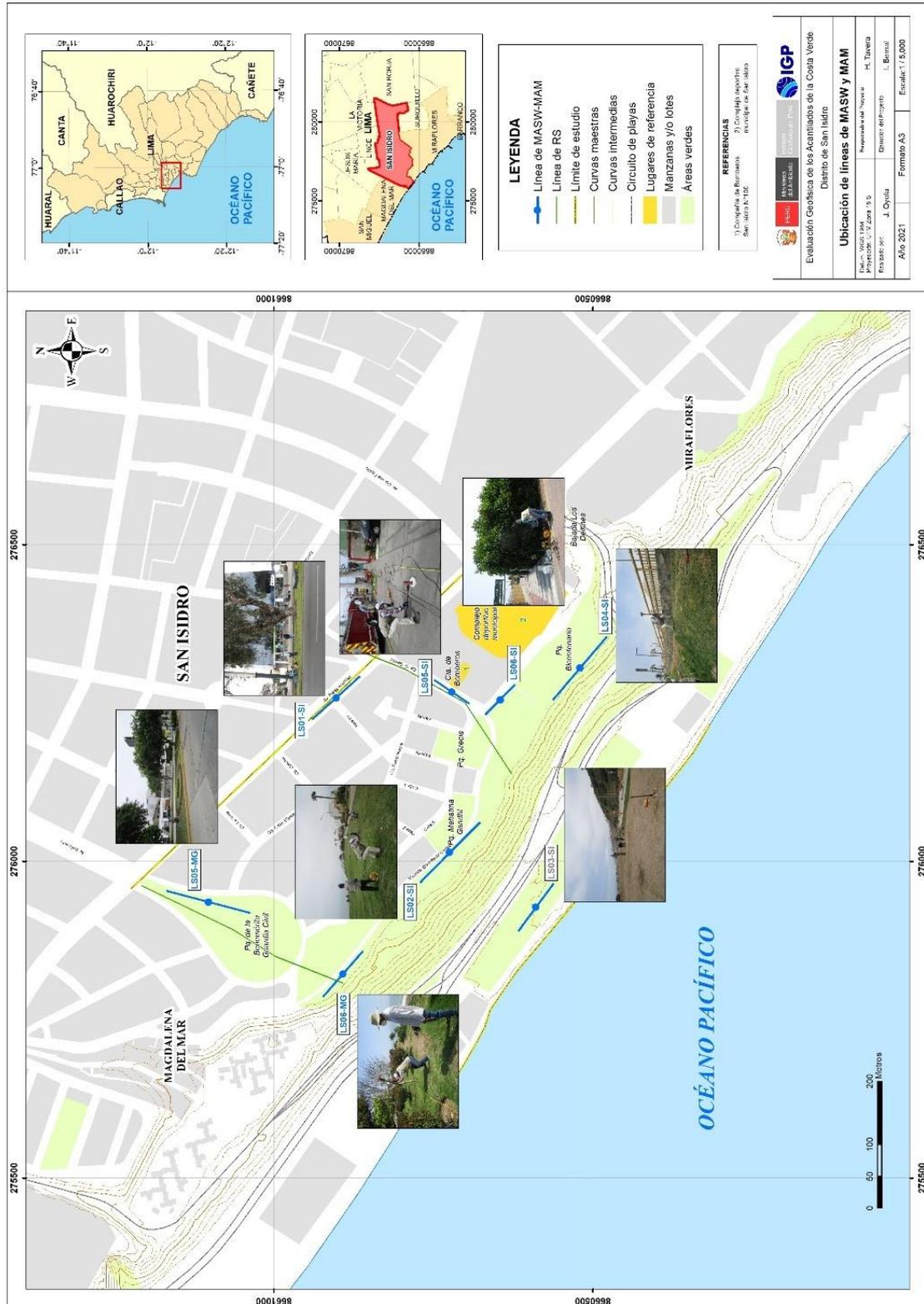


Figura 12. Distribución espacial de las líneas MASW, MAM, codificadas como LS01-SI, ..., LS06-SI, LS05-MG y LS06-MG. El código en gris, corresponde a la línea realizada en la zona baja del acantilado

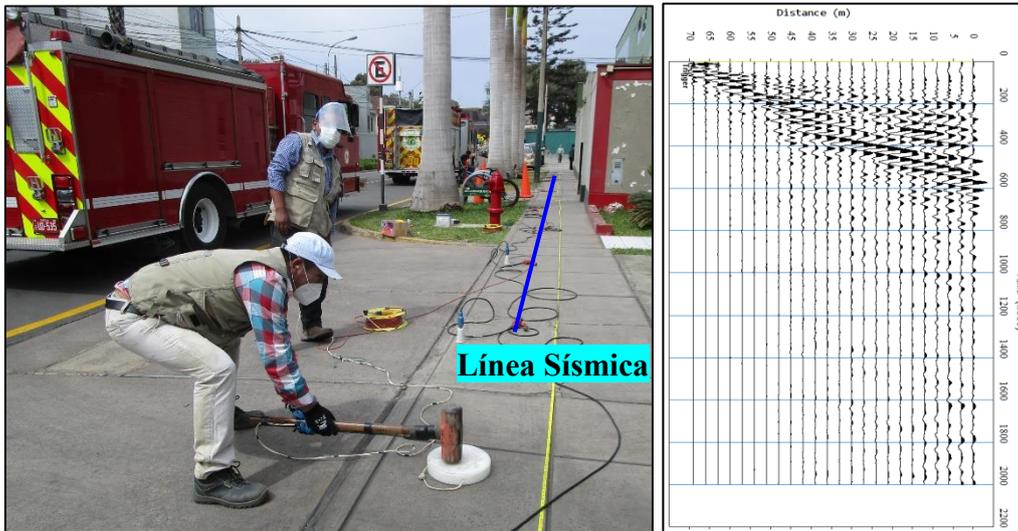


Figura 13. Disposición del equipo de adquisición de datos - MASW (calle Godofredo García) y registro sísmico obtenido.

### 2.2.2.- Procesamiento y análisis

Los datos sísmicos recolectados fueron procesados con el programa SeisImager y 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 Vs en una dimensión (1D) para el punto central de la línea, ver Figura 14.

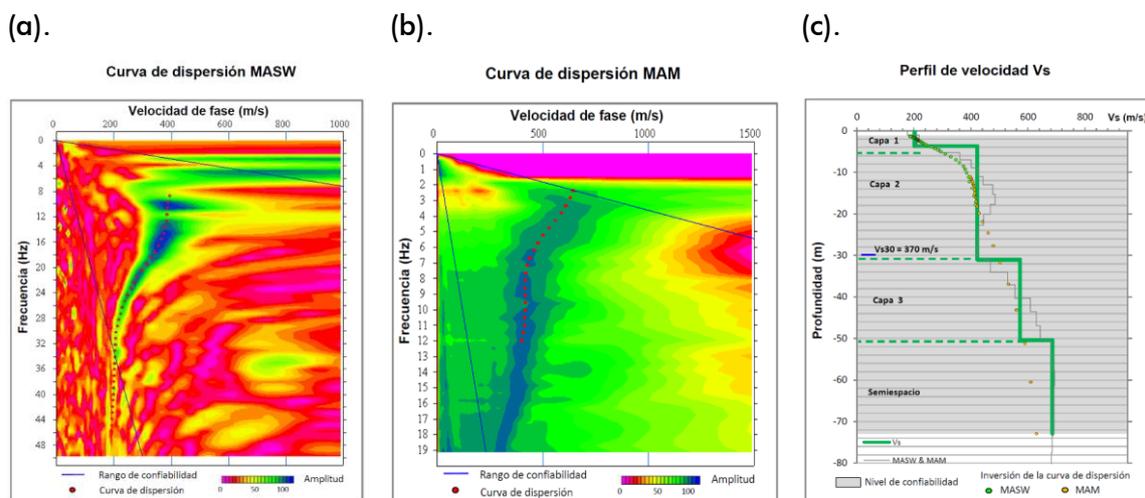


Figura 14. Curvas de dispersión obtenidos a partir de las técnicas MASW (a) y MAM (b) y perfil de velocidad obtenido a partir de la combinación de ambos ensayos (c).

Para el análisis de los resultados obtenidos, se considera la clasificación de suelos propuesta por la Norma de Diseño Sismorresistente E.030 (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 que permiten analizar con mayor detalle las características de la zona, tal como son mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de perfiles de suelo a partir de la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente (2018).

Clasificación de los perfiles de Suelo					
N°	Vs (m/s)	Norma E.030		Descripción	
1	< 180	S3	Suelo blando	Material aluvial suelto	
2	180 a 350	S2	Suelo medianamente rígido	Material aluvial suelto a medianamente compacto	
3	350 a 500			Material aluvial medianamente compacto	
4	500 a 800	S1	Roca o suelo muy rígido	Material aluvial compacto	
5	800 a 1500			Material aluvial muy compacto	
6	> 1500	S0	Roca dura	Roca	

### 2.2.3.- Resultados e interpretación

#### a) Resultados

En el área de estudio se realizaron 8 líneas sísmicas MASW y MAM con resolución promedio hasta una profundidad de  $\approx 80$  metros (Figura 12). Los resultados obtenidos para la línea LS01-SI se muestran en la Figura 15 y en el Anexo II, para las líneas restantes. El análisis realizado para cada línea sísmica es mostrado a continuación:

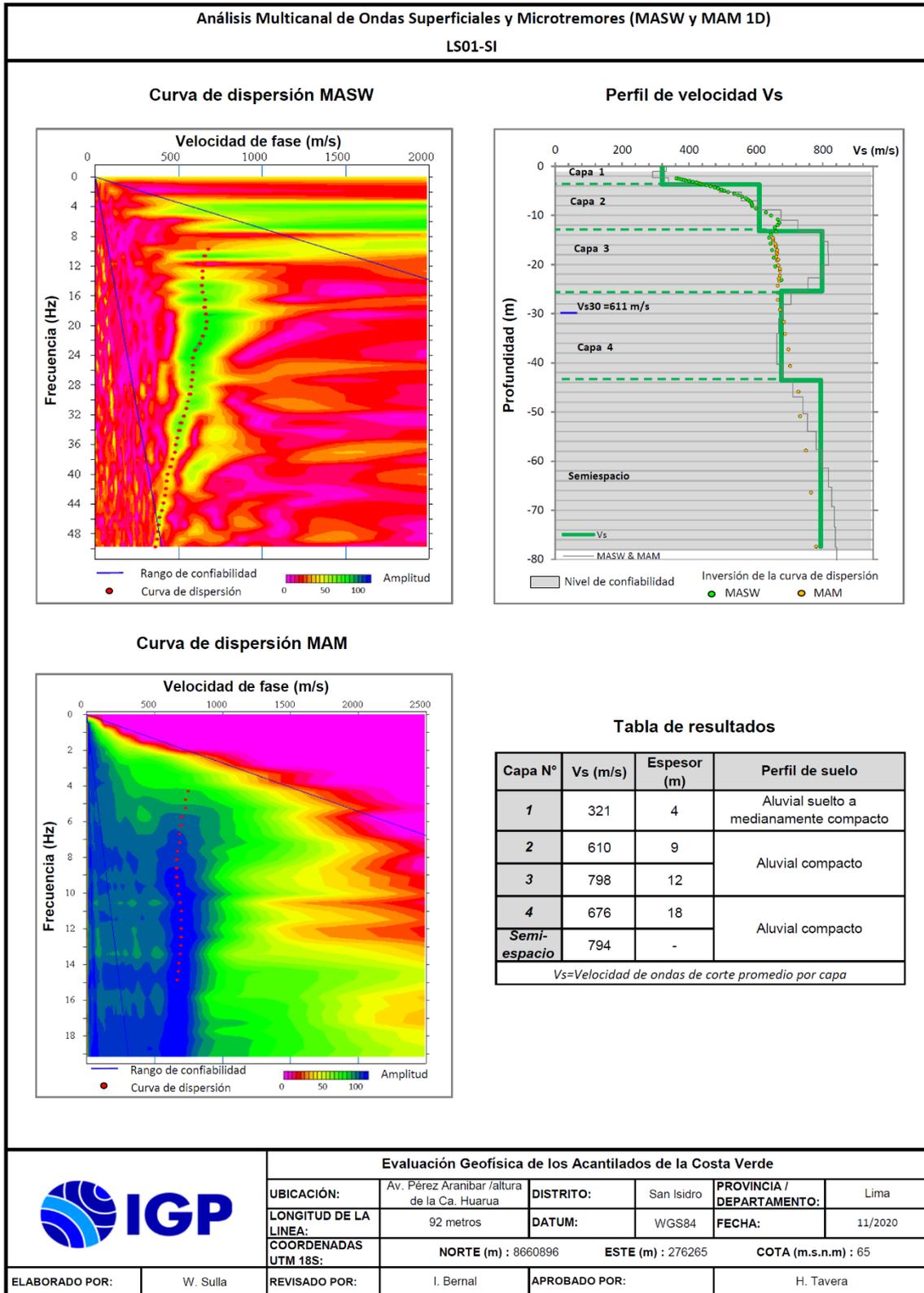


Figura 15. Resultados obtenidos con el ensayo MASW y MAM para la línea sísmica LS01-SI.

**Líneas sísmicas LS02-SI:** Realizada en el Malecón Godofredo García con resolución hasta 80 metros de profundidad. Este perfil permite identificar la existencia de cuatro capas sísmicas: La primera de 7 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 252 m/s correspondiente a material aluvial suelto a medianamente compacto; la segunda capa, con  $V_s$  de 454 m/s y espesor de 11 metros, corresponde a material aluvial medianamente compacto; la tercera capa con  $V_s$  de 569 m/s y 16 metros de espesor sugiere material aluvial compacto y la cuarta capa, con  $V_s$  874 m/s y 24 metros junto el semiespacio con velocidades  $V_s > 1164$  m/s, correspondería a material aluvial muy compacto.

**Línea sísmica LS03-SI:** Realizada en el Circuito de Playas, altura del Malecón Godofredo García con resolución hasta 52 metros de profundidad. Este perfil permite identificar la existencia de 3 capas sísmicas: La primera, de 7 metros de espesor y velocidades de  $V_s$  236 m/s y la segunda capa con una velocidad de  $V_s$  349 m/s y 9 metros de espesor, ambas corresponden a material aluvial suelto a medianamente compacto; la tercera capa con velocidades  $V_s$  de 719 m/s y espesor 10 metros, sugieren la presencia de material aluvial compacto. El semiespacio con velocidades  $V_s > 1087$  m/s, correspondería a materiales aluviales compactos.

**Líneas sísmicas LS04-SI:** Realizada en el parque Bicentenario con resolución hasta 68 metros de profundidad. Este perfil permite identificar la existencia de cuatro capas sísmicas: La primera, de 5 metros de espesor y velocidades de  $V_s$  285 m/s, corresponden a material aluvial suelto a medianamente compacto; la segunda capa con  $V_s$  de 463 m/s y 12 metros de espesor, corresponde a material aluvial medianamente compacto; la tercera y cuarta capa con velocidades  $V_s$  entre 627 y 755 m/s y espesores de 19 y 21 metros respectivamente están conformadas por material aluvial compacto. El Semiespacio con

velocidades  $V_s > 832$  m/s, correspondería a material aluvial muy compacto.

**Línea sísmica LS05-SI:** Realizada en la Compañía de Bomberos N° 100 con resolución hasta 80 metros de profundidad. Este perfil permite identificar la existencia de cuatro capas sísmicas: La primera de 5 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 304 m/s corresponden a material aluvial suelto a medianamente compacto; la segunda capa de 6 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 567 m/s corresponde a material compacto; la tercera capa con  $V_s$  de 491 m/s y espesor 9 metros de espesor, corresponden a material aluvial medianamente compacto. La cuarta capa con velocidades  $V_s$  de 787 m/s y espesor de 30 metros corresponde a material aluvial compacto. El semiespacio con velocidades  $V_s > 876$  m/s, corresponderían a materiales aluviales muy compactos.

**Línea sísmica LS06-SI:** Realizada en el ingreso al parque Bicentenario con resolución hasta 72 metros de profundidad Este perfil permite identificar la existencia de tres capas sísmicas: La primera, de 11 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 281 m/s que sugieren la presencia de material aluvial suelto a medianamente compacto; la segunda capa de 14 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 409 m/s que corresponden a material aluvial medianamente compacto; la tercera capa, con 22 metros de espesor y  $V_s$  de 626 m/s y el semiespacio, con velocidades  $V_s > 861$  m/s, estas capas sugieren material aluvial muy compacto.

**Línea sísmica LS05-MG:** Realizada en el parque de la Benemérita Guardia Civil (parque La Pera), con resolución hasta 80 metros de profundidad. Este perfil permite identificar la existencia de cuatro capas sísmicas: La primera de 5 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 393 m/s corresponde a material aluvial medianamente compacto; la

segunda capa, con velocidades  $V_s$  de 550 m/s y espesor de 10 metros y la tercera capa con velocidades  $V_s$  de 756 m/s y 31 metros de espesor, ambas capas corresponderían a material aluvial compacto. La cuarta capa con velocidades  $V_s$  de 916 m/s y espesor de 22 metros junto con el semiespacio, con velocidades  $V_s > 1198$  m/s, corresponderían a material aluvial muy compacto.

**Línea sísmica LS06-MG:** Realizada en el Malecón Godofredo García, a la altura del parque de la Benemérita Guardia Civil, con resolución hasta 78 metros de profundidad. Este perfil permite identificar la existencia de cuatro capas sísmicas: La primera de 5 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 207 m/s corresponde a material aluvial suelto a medianamente compacto; la segunda capa, con velocidades  $V_s$  de 421 m/s y espesor de 10 metros, está conformada por material aluvial medianamente compacta; la tercera capa con velocidades  $V_s$  de 553 m/s y 13 metros de espesor y la cuarta capa, con  $V_s$  774 m/s y 22 metros de espesor, ambas capas corresponderían a material aluvial compacto. El semiespacio con velocidades  $V_s > 970$  m/s, correspondería a material aluvial muy compacto.

Finalmente, en la Tabla 5 se presenta el resumen de los valores de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) y espesores de capas obtenidos en cada uno de los perfiles de suelo (Tabla 4).

## **b) Interpretación**

Los perfiles de velocidad de ondas de corte obtenidos para el distrito de San Isidro permiten identificar la presencia en el subsuelo de 4 capas con diferente grado de compactación bien diferenciada en las cercanías del acantilado en comparación con los suelos ubicados a mayor distancia en dirección del área urbana.

Tabla 5. Valores de espesor y Vs de los perfiles sísmicos obtenidos para el área de estudio.

Línea Sísmica	Superficie → Profundidad										VS30 (m/s)
	N° DE CAPA										
	1		2		3		4		Semiespacio		
	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	
LS01-SI	321	4	610	9	798	12	676	18	794	-	611
LS02-SI	252	7	454	11	569	16	874	24	1164	-	409
LS03-SI	236	7	349	9	719	10	-	-	1087	-	410
LS04-SI	285	5	463	12	627	19	755	21	832	-	458
LS05-SI	304	5	567	6	491	9	787	30	876	-	503
LS06-SI	281	11	409	14	626	22	861	-	-	-	394
LS05-MG	393	5	664	10	756	31	916	22	1189	-	637
LS06-MG	207	5	421	10	553	13	774	22	970	-	394

	Aluvial suelto ( $V_s < 180$ m/s)
	Aluvial suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	Aluvial medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	Aluvial compacto (500 – 800 m/s)
	Aluvial muy compacto (800 – 1500 m/s)
	Roca ( $V_s > 1500$ m/s)

**-Variación lateral de las propiedades físicas de los suelos:** A lo largo del acantilado los suelos son menos consolidados ( $V_s < 500$  m/s) en comparación con los que se encuentran a mayores distancias hacia el área urbana. Estos suelos forman capas de 17 a 18 metros de espesor a lo largo del Malecón Godofredo García y el parque Bicentenario, ver Figura 16. Por debajo del suelo menos consolidado, se sugiere material muy consistente por lo cual la rigidez de los suelos se incrementa notablemente.

### 2.3.- Método de Tomografía Eléctrica

El método de tomografía eléctrica (ERT) permite determinar las variaciones de resistividad y conductividad eléctrica de las rocas y suelos para conocer la ubicación de los niveles freáticos en su estructura. En general, los materiales que conforman el subsuelo muestran diversos rangos



Figura 16. Correlación de los resultados obtenidos en cada perfil sísmico (Vs) e identificación de la estructura del subsuelo en los ACV del distrito de San Isidro.

de valores de resistividad ( $\rho$ ) que dependen principalmente de la porosidad del suelo, conductividad de las partículas y del contenido de agua o de sales disueltas en las fracturas de las rocas.

### **2.3.- Método de Tomografía Eléctrica**

El método de tomografía eléctrica (ERT) permite determinar las variaciones de resistividad y conductividad eléctrica de las rocas y suelos para conocer la ubicación de los niveles freáticos en su estructura. En general, los materiales que conforman el subsuelo muestran diversos rangos de valores de resistividad ( $\rho$ ) que dependen principalmente de la porosidad del suelo, conductividad de las partículas y del contenido de agua o de sales disueltas en las fracturas de las rocas.

#### **2.3.1.- Adquisición de datos**

Los datos recolectados en campo corresponden al registro de valores de resistividad obtenidos en 6 líneas de ERT distribuidas en el área de estudio, tal como se observa en la Figura 17. El instrumental utilizado en campo corresponde al equipo de Resistividad /IP Syscal Pro más cables y accesorios. En la Tabla 6, se detalla las características de las líneas ERT realizadas en los ACV del distrito de San Isidro.

#### **2.3.2.-Procesamiento y análisis**

Para el procesamiento de los datos recolectados en campo, fue necesario realizar la corrección por efectos de topografía usando algoritmos de inversión propios de métodos geoeléctricos y de procesamiento de imágenes. Asimismo, para la interpretación de los resultados se debe tener en cuenta que son varios los factores que influyen en las propiedades físicas de los suelos (grado de saturación, porosidad y forma del poro, salinidad del

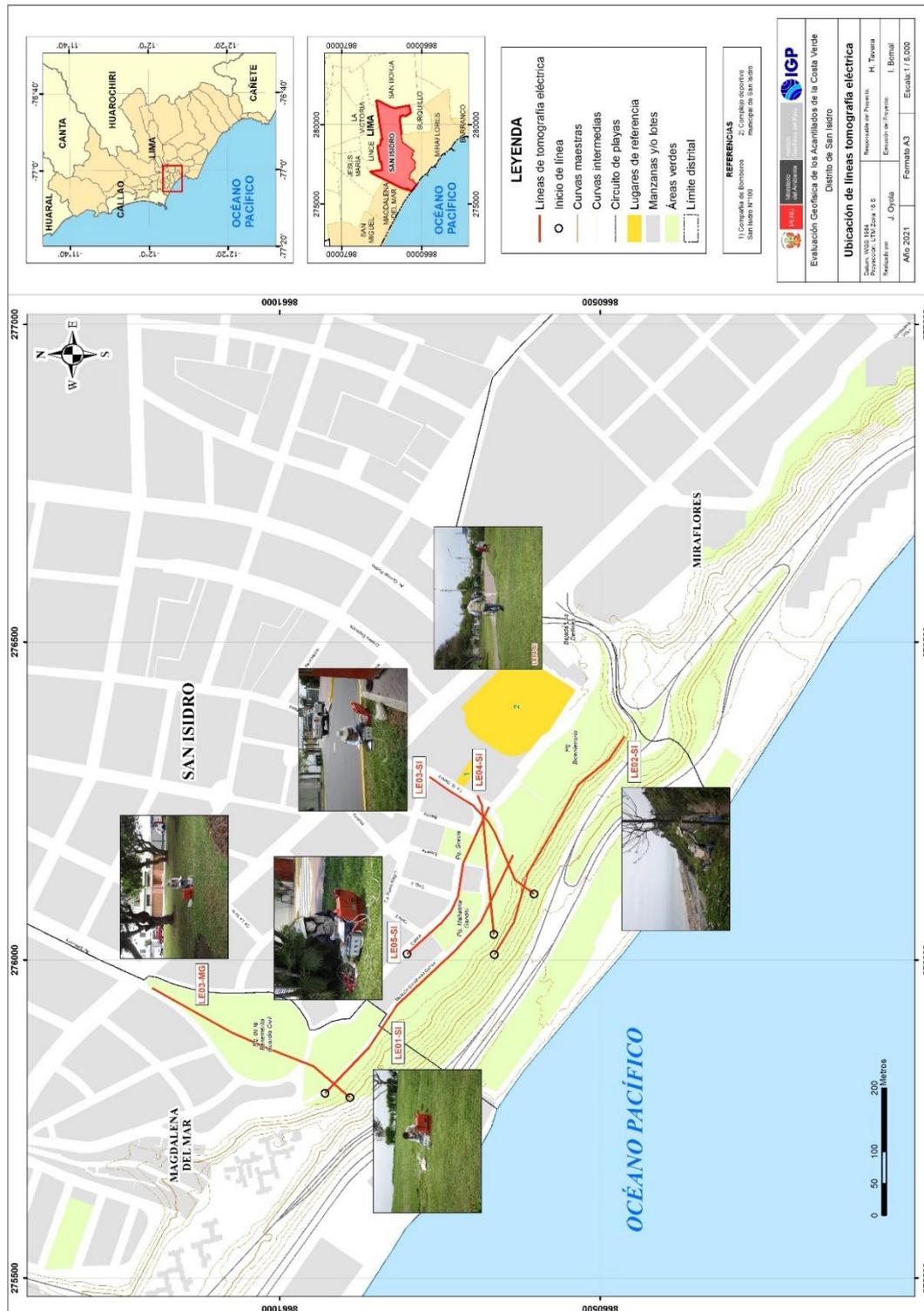


Figura 17: Distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica (ERT), codificadas como LE01-SI,...,LE05-SI y LE03-MG.

Tabla 6: Parámetros físicos de los tendidos de tomografía eléctrica.

Línea Eléctrica	Coordenadas UTM – WGS84		Cota (m)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Longitud total (m)
	Este (m)	Norte (m)			
LE01-SI	275791	8660930	51	20	460
	276165	8660636	56		
LE02-SI	276009	8660665	40	20	380
	276352	8660462	46		
LE03-SI	276104	8660604	41	20	240
	276288	8660766	60		
LE04-SI	276040	8660666	46	20	200
	276259	8660692	60		
LE05-SI	276009	8660802	60	20	260
	276241	8660674	60		
LE03-MG	275784	8660890	43	20	340
	275956	8661200	60		

fluido, tipo y composición de la roca, temperatura, procesos geológicos que afectan a los materiales); es decir, el incremento de fluidos en el terreno se verá reflejado por una disminución en los valores de resistividad. En la Tabla 7, se presentan algunos valores de resistividad relacionados con los diferentes tipos de suelos y rocas.

Tabla 7: Valores representativos de resistividad (UNC, 2000).

*MATERIAL	RESISTIVIDAD (ohm-m)
Arcillas saturadas	5-20
Arcillas no saturadas	20-40
Limos saturados	20-100
Limos no saturados	100-200
Arenas saturadas	100-200
Arenas no saturadas	400-700
Grava saturada	300-500
Grava no saturada	500-2000
Roca fracturada saturada	100-2000
Roca fracturada	1500-5000
Roca sana	>5000

### 2.3.3.- Resultados e interpretación

#### a) Resultados

En el distrito de San Isidro se realizaron 5 secciones geoelectricas con resolución hasta los 50 de profundidad. En la Figura 18, se presenta la sección geoelectrica para la línea LE01-SI y en el Anexo IV, para las secciones restantes. El análisis realizado para cada sección geoelectrica y/o tomografía eléctrica, permite tener los siguientes resultados:

**-Sección geoelectrica LE01-SI:** Realizada en el Malecón Godofredo García, con una longitud de 460 metros y orientada de NO-SE (paralela al acantilado). En esta sección, predominan depósitos de baja a moderada resistividad. Las bajas resistividades menores a 80 Ohm-m, se asocian a depósitos aluviales con alto contenido de humedad, estos valores a nivel superficial coinciden con zonas identificadas como puntos críticos presentes en el Malecón Godofredo García a la altura del parque Grecia. A nivel superficial, se identifica la presencia de anomalías dispersas en forma de elipses con altos valores de resistividad, asociándose a material seco o la presencia de grietas.

**-Sección geoelectrica LE02-SI:** Realizada en el Malecón Godofredo García, a la altura del parque Bicentenario sobre una longitud de 380 metros y en dirección NO-SE (paralela al acantilado). En esta sección predominan depósitos de baja resistividad (<80 Ohm-m), debido a la presencia de materiales aluviales con alto contenido de humedad. En el extremo SE de la sección (altura del parque Bicentenario) se delimitan depósitos con moderado contenido de humedad hasta una profundidad de 40 metros. Por otro lado, a nivel superficial, en la zona céntrica de la sección, se identifica anomalías en forma de elipses con altos valores de resistividad, asociándose a material seco o la presencia de grietas.

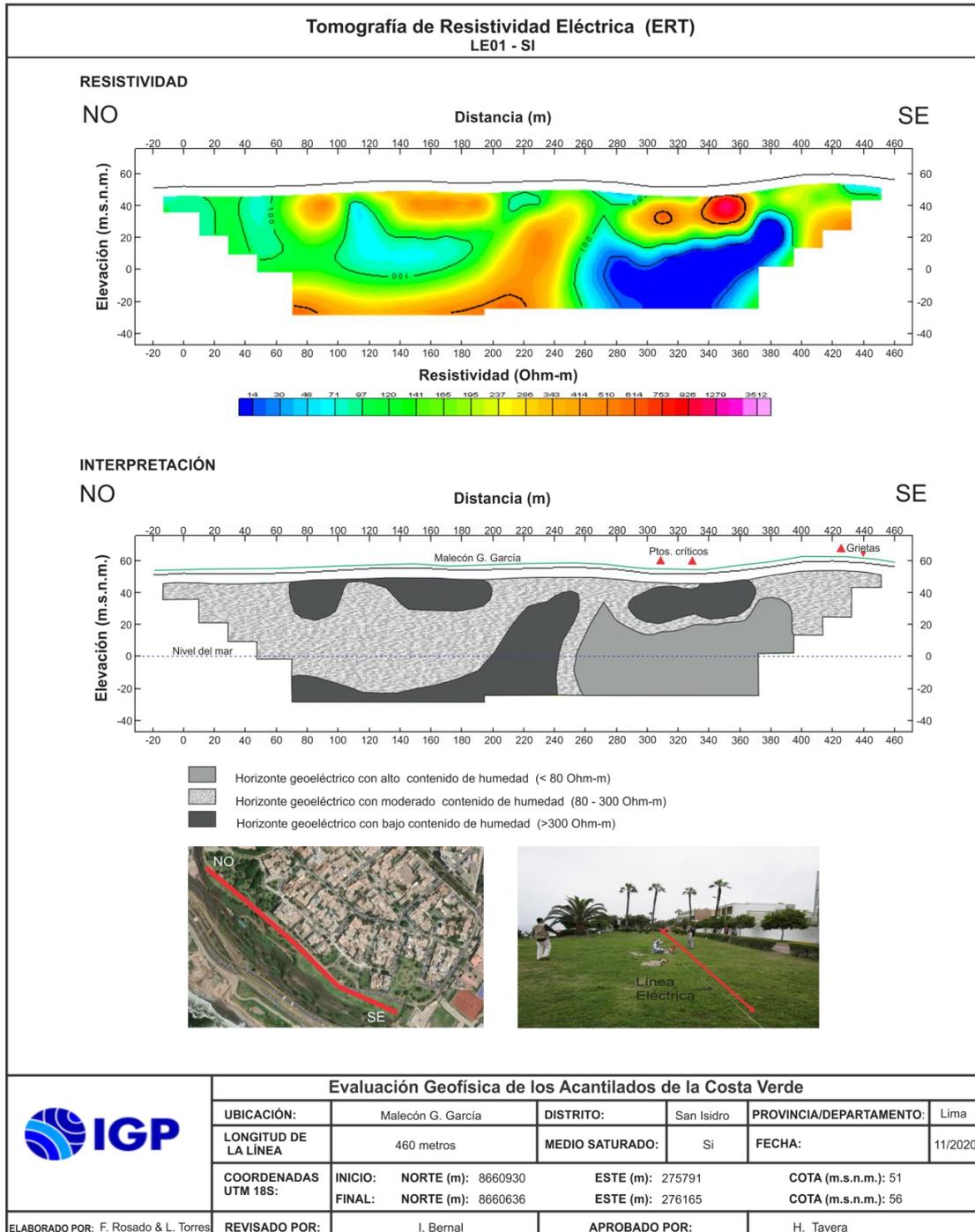


Figura 18: Resultado de tomografía eléctrica para la línea LE01-SI.

**-Sección geoelectrica LE03-SI** Realizada en el Malecón Godofredo García y parque Grecia sobre una longitud de 240 metros y en dirección SO-NE (perpendicular al acantilado). En esta sección se presentan 2 horizontes geoelectricos: El primero de moderada resistividad (80 a 300 Ohm-m) está presente en el tramo del parque

Grecia y la calle Punta Negra, alcanza un espesor de 20 metros. El segundo horizonte, a lo largo de toda la sección presenta alto contenido de humedad ( $<80$  Ohm-m). Este horizonte está cerca de la superficie a la altura del Malecón G. García en donde se identifica la presencia de grietas y asentamientos de suelos visibles en superficie.

**-Sección geoelectrica LE04-SI:** Realizada en el Malecón Godofredo García y parque Grecia sobre una longitud de 200 metros y dirección SO-NE (perpendicular al acantilado). En esta sección predominan depósitos de moderada resistividad (80 a 300 Ohm-m) debido a la presencia de materiales aluviales con moderado contenido de humedad. A nivel superficial y a lo largo del parque Grecia se ha identificado la presencia de depósitos con alto contenido de humedad con espesores que alcanzan los 50 metros.

**-Sección geoelectrica LE05-SI:** Realizada en la Calle A y parque Grecia, sobre una longitud de 200 metros y en dirección NO-SE (paralela al acantilado). En esta sección predominan los depósitos de moderada resistividad (80 a 300 Ohm-m) debido a la presencia de materiales aluviales con moderado contenido de humedad. Sin embargo, a nivel superficial, en el parque Mahatma Gandhi existen de manera focalizada depósitos con alto contenido de humedad que alcanzan los 20 metros de profundidad, los cuales estarían asociados probablemente al riego de las áreas verdes del parque Mahatma Gandhi. Por debajo del parque Grecia, se identifica la presencia de anomalías en forma de elipses con altas resistividades que podrían deberse con la presencia de asentamientos diferenciales en el suelo.

**-Sección geoelectrica LE03-MG:** Realizada en el parque de la Benemérita Guardia Civil, sobre una longitud de 340 metros y en dirección SO-NE (perpendicular al acantilado). En esta sección se presentan 4 horizontes geoelectricos: El primero de alta resistividad

(>300 Ohm-m) está presente a lo largo del parque con espesores de 10 a 20 metros. El segundo horizonte, a lo largo de toda la sección presenta moderado contenido de humedad (80 a 300 Ohm-m). Este horizonte está cerca de la superficie a altura del Malecón Godofredo García y presenta espesores de 5 a 20 metros. El tercer horizonte, presente a lo largo de toda la sección se caracteriza por su alto contenido de humedad (<80 Ohm-m), estando cerca de la superficie en el borde del acantilado. El cuarto horizonte, presenta alta resistividad.

### **b) Interpretación**

En las secciones de tomografía eléctrica elaboradas para los ACV del distrito de San Isidro, se ha identificado la presencia de horizontes con suelos húmedos y/o saturados con las siguientes características:

- Hacia el extremo noroeste del distrito de San Isidro (Malecón Godofredo García y el parque de la Benemérita Guardia Civil), se ha identificado la presencia de tres horizontes, el primero a la altura de la Av. del Ejército con un espesor mayor a 30 metros con bajo contenido de humedad; el segundo con moderado contenido de humedad y espesor promedio de 20 metros; y el tercer horizonte con alto contenido de humedad y espesores mayores a 30 metros al borde del acantilado (Figura 19, Línea LE03-MG).
  
- En la zona central al borde del acantilado (parque Grecia y malecón G. García), se ha identificado el predominio de un horizonte con bajo a moderado contenido de humedad; asimismo, a la altura de los parques Grecia y Mahatma Gandhi, y a una profundidad de 20 metros se identifica la presencia de material con alto contenido de humedad, que en superficie contribuye a la generación de grietas y asentamientos (Figura 19, Línea LE01-SI).

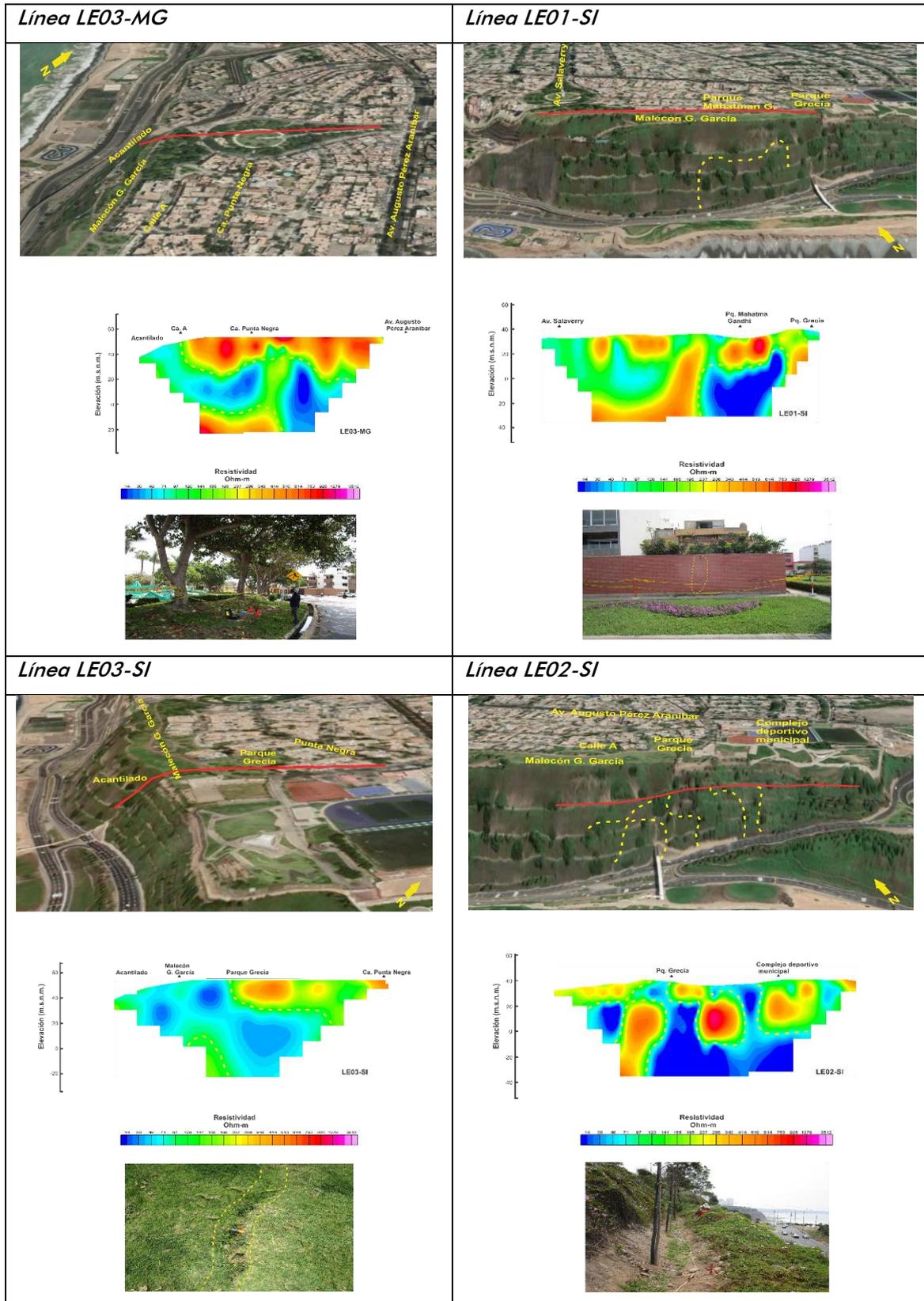


Figura 19. Ubicación y orientación de las líneas de tomografía eléctrica realizadas en el extremo NO (LE03-MG), Central (LE01-SI) y SE (LE03-SI y LE02-SI) de los ACV. Las líneas discontinuas delimitan las zonas con mayor contenido de humedad en cada sección, así como su proyección en el perfil del acantilado.

- Hacia el extremo sureste del distrito de San Isidro (malecón Godofredo García, parque Grecia y Complejo deportivo municipal), se ha identificado la presencia de dos horizontes geoeléctrico, el primero entre el parque Grecia, Ca. Punta Negra y calle Godofredo García con 40 metros de espesor y moderado a alto contenido de humedad; y por debajo se tiene la presencia de un segundo horizonte con alto contenido de humedad (Figura 19, Línea LE02-SI).

#### **2.4.- Método de Georadar**

El georadar es una técnica no destructiva orientada al estudio del subsuelo a nivel superficial basado en la capacidad de las ondas de radar de baja frecuencia (10 MHz - 2,5 GHz) para propagarse a través de medios poco conductivos con diferentes propiedades electromagnéticas y de permeabilidad. El método emplea una antena emisora para dirigir pulsos electromagnéticos de 1-20 ns de duración hacia el interior del terreno. Este frente de ondas es parcialmente reflejado al encontrar una discontinuidad o un cambio de material en el subsuelo, pudiendo ser detectado en la superficie mediante una antena receptora dispuesta a tal efecto. Al ir desplazando el sistema sobre la superficie del terreno es posible registrar la historia de reflexiones detectadas en el subsuelo bajo la línea de desplazamiento del equipo (Biskup et al. 2005; Villela, 2013). De esta forma se obtienen los llamados radargramas (Figura 20), similares a los registros clásicos de sismica de reflexión, pero con la gran diferencia de que, en el caso del radar, la propagación de las ondas está condicionada por las características electromagnéticas del medio de propagación. Este método permite determinar e identificar en base a las reflexiones, los límites de las interfaces de los diferentes horizontes con cierto grado de compactación, zonas de rellenos y anomalías relacionados a algún tipo de material distinto al contenido del suelo.

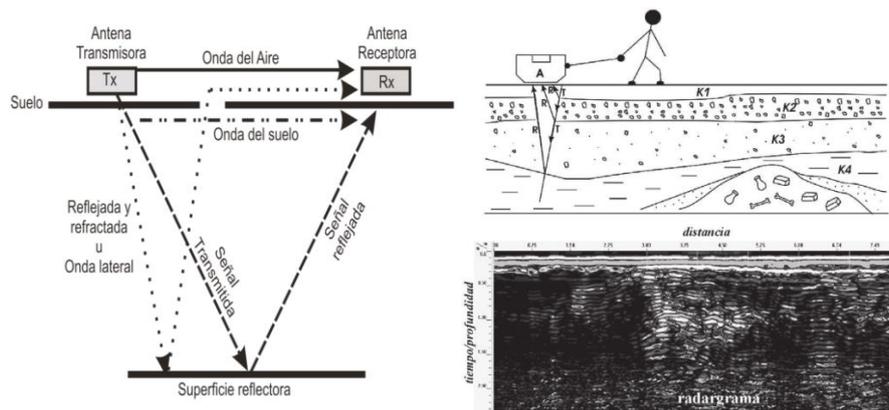


Figura 20. Esquema de la base del método de georadar y ejemplo del registro de un radargrama (Vilella, 2013).

### 2.4.1.- Adquisición de datos

La exploración del subsuelo se realizó con un georadar GSSI y antena de 350 MHz. En general, la capacidad de penetración de la onda electromagnética depende de las condiciones de conductividad y permisividad del subsuelo y en este caso, se ha llegado a profundidades de 6 metros. Durante el trabajo de campo se utilizó una configuración de 512 muestras/escaneo, 50 scan/m. con ganancias manuales y automáticas para obtener mejores resultados (200scan/segundos) y una configuración por distancia de odómetro de 20 metros (Figura 21).



Figura 21. Disposición del georadar utilizando la antena de 350 MHz.

En el distrito de San Isidro se realizaron 09 líneas de GPR (antena de 350 MHz), cuyas coordenadas son indicadas en la Tabla 8 y su distribución espacial en la Figura 22.

Durante los trabajos de campo, los datos registrados eran visualizados en los radargramas a fin de verificar la calidad de señal y el nivel de ruido. Para mejorar la relación señal/ruido fue necesario modular la ganancia en modo manual, así como aumentar la amplitud de los datos multiplicando cada muestra por un valor constante. Este procedimiento permitió amplificar las reflexiones más débiles para una mejor identificación.

Tabla 8. Coordenadas y características de las líneas de GPR.

	Línea GPR	Coordenadas UTM –WGS84		Cota (m.s.n.m.)	Longitud total (m)	Antena (MHz)
		Este (m)	Norte (m)			
1	GPR01- SI	275777	8660962	61	384	350
		276051	8660695	62		
2	GPR02- SI	276163	8660630	62	227	350
		275973	8660750	62		
3	GPR03-SI	276139	8660638	61	48	350
		276167	8660685	63		
4	GPR04-SI	275980	8661194	75	487	350
		276307	8660836	73		
5	GPR05-SI	276363	8660918	77	283	350
		276233	8660669	76		
6	GPR06-SI	276291	8660854	75	390	350
		276557	8660574	75		
7	GPR07-SI	276233	8660675	71	240	350
		276414	8660516	72		
8	GPR08-SI	276250	8660565	63	138	350
		276363	8660479	63		
9	GPR09-SI	275847	8660878	62	339	350
		275954	8661190	65		

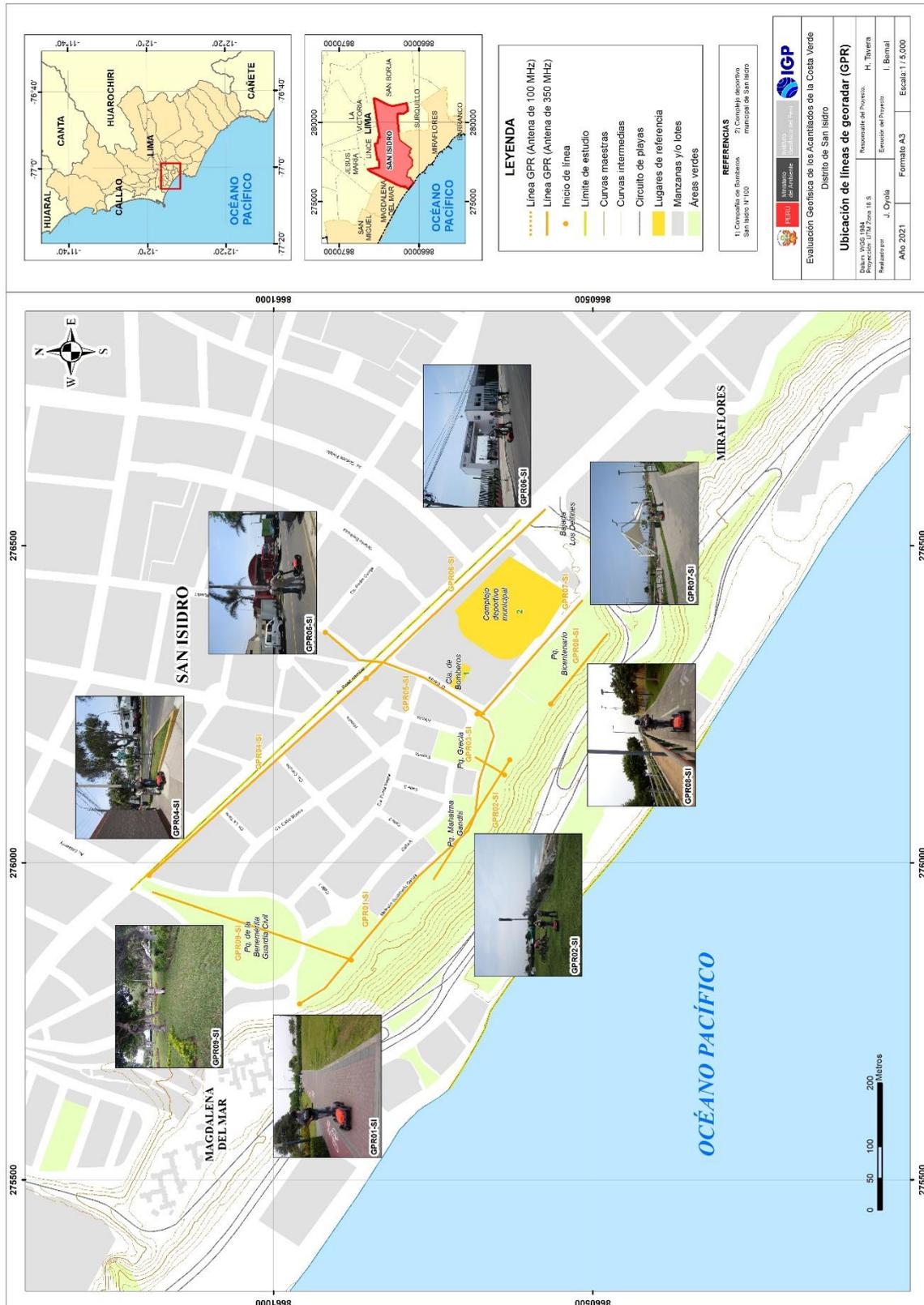


Figura 22. Distribución espacial de las líneas de GPR, codificados como GPR01,...,GPR09.

## 2.4.2.-Procesamiento y análisis

El procesamiento de los radargramas se realizó con el programa RADAN 7 y el uso de filtros para la remoción del ruido de fondo, ganancia automática, pasa bandas, substracción de la media y filtro exponencial de ganancia. Debido a que las características físicas de los suelos son diferentes en cada línea de exploración, los valores de cada filtro fueron diferentes para cada perfil. También, en caso de que la señal perdiera su intensidad o no mejorará la respuesta en profundidad, se eliminó alguno de los filtros.

La interferencia de altas frecuencias provenientes de torres de transmisión de telefonía celular o de radio, campos electromagnéticos provocados por cableados eléctricos de alta tensión, estructuras metálicas cercanas, etc., fueron removidos con el uso de filtros. En este sentido, para la identificación en los radargramas de los diferentes tipos de suelos con presencia o no de humedad, se considera los valores de la constante dieléctrica, indicados en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de la constante dieléctrica para diferentes materiales (GSSI).

Material	Constante dieléctrica	Material	Constante dieléctrica
Aire	1	Granito húmedo	6.5
Suelos arcillosos / arcillosos secos	2.5	Travertinos	8
Arcilla seca	4	Caliza húmeda	8
Arenas secas	4	Basalto húmedo	8.5
Asfalto	5	Hormigón húmedo	12.5
Granito seco	5	Arenas húmedas	15
Hormigón seco	5.5	Suelos arenosos húmedos	23.5
Caliza seca	5.5	Arenas saturadas	25
Arena & grava seca	5.5	Arcilla húmeda	27
Mineral seco / suelos arenosos	6	Suelo orgánico (saturado)	64
Agua de mar	81	Arenisca húmeda	6

Para proceder con la interpretación de los radargramas se define la existencia en la zona de estudio de tres tipos de anomalías: a) Anomalías de

tipo hiperbólico, que se evidencian por reflectores hiperbólicos con base angosta y ancha, la primera es asociada a materiales metálicos enterrados (tuberías, cables) y la segunda a grandes bloques de roca, cavidades y túneles; b) Anomalías de tipo lineal, de grande y pequeña extensión, la primera se asocia a interfaces entre dos medios con diferentes propiedades electromagnéticas (nivel freático, fracturas y fallas) y la segunda, a hoyos, cavidades y zonas de asentamiento de suelos; c) Anomalías puntuales, cuyos reflectores se proyectan de manera vertical y se asocian a la presencia de buzones, tapas de medidores y otros similares vistas en superficie (Figura 23).

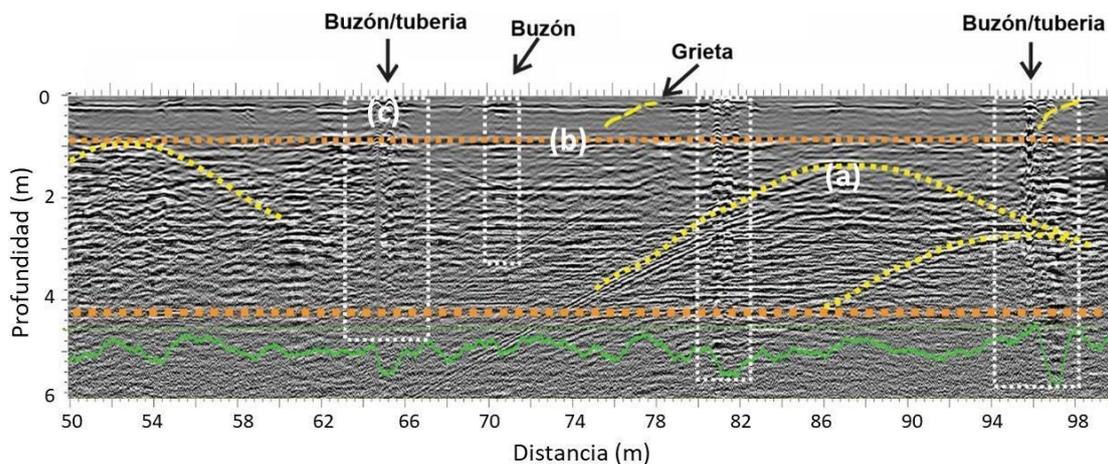


Figura 23. Radargrama, con los diferentes tipos de reflectores asociados a anomalías de tipo hiperbólico (a), lineal (b) y puntuales (c).

### 2.4.3.- Resultados e interpretación

#### a) Resultados

En el área de estudio se realizaron 09 líneas de GPR, con resolución hasta los 6 metros de profundidad. Los resultados obtenidos para la línea GPR01-SI se muestran en la Figura 24 y en el Anexo V, para las líneas restantes. El análisis realizado para cada línea GPR permite obtener los siguientes resultados:

**Línea GPR01-SI:** Realizada en el Malecón Godofredo García, con una longitud de 595 metros y orientada en dirección NO a SE, paralelo al acantilado. En la línea se identifica la existencia de una capa de aproximadamente 2.0 metros de espesor, conformada por material heterogéneo. Asimismo, se presentan anomalías en forma de pliegues asociados a la presencia de material suelto a la altura de los parques Gandhi y Grecia.

**Línea GPR2-SI:** Realizada paralela al malecón Godofredo García, con una longitud de 227 metros y orientada en dirección SE a NO, cerca al acantilado. En la línea se identifica la existencia de una capa de 1 metro de espesor conformada por material heterogéneo. Asimismo, al inicio y final del perfil se observa la presencia de grietas hasta profundidades de un metro. Asimismo, a la altura del parque Gandhi se tiene la presencia de anomalías asociadas a asentamientos del suelo.

**Línea GPR3-SI:** Realizada desde el acantilado hacia el parque Grecia (antena de 350 MHz) sobre una longitud de 48 metros y orientada en dirección SO a NE, perpendicular al acantilado. En la línea se identifica la existencia de una capa de 1.5 metros de espesor conformada por material heterogéneo. Asimismo, se presentan grietas al inicio del perfil pegada al acantilado y que alcanzan 1.5 metros de profundidad. Otras anomalías están asociadas a tuberías, aspersores de riego y veredas.

**Línea GPR4-SI:** Realizada en la Av. Pérez Aranibar, entre el parque de la Benemérita Guardia Civil y la calle Godofredo García, con una longitud de 487 metros y orientada en dirección NO a SE. En la línea se identifica la existencia de una capa de 2 metros de espesor conformado por material heterogéneo. Asimismo, a la calle Carlos Concha se observa la presencia de grietas que alcanzan profundidades de 2

metros, así como anomalías en forma de pliegues asociados a asentamientos a la altura de la Cuadra 19 de la Av. Pérez Aranibar.

**Línea GPR5-SI:** Realizada sobre la calle Godofredo García, con una longitud de 283 metros y orientada en dirección NE a SO. En la línea se identifica la existencia de una capa de 1.2 metros de espesor conformado por material heterogéneo. Asimismo, a la altura de la Estación de Bomberos se presentan grietas que alcanzan 1 metro de profundidad, y otras debido a material suelto y asentamientos.

**Línea GPR6-SI:** Realizada sobre la Av. Pérez Aranibar, entre la Calle Godofredo García y la bajada Los Delfines, con una longitud de 390 metros y orientada en dirección NO a SE. En esta línea se identifica la existencia de una capa de 1.0 metro de espesor conformado por material heterogéneo. Asimismo, se presentan grietas a la altura de la calle V. Riestra y frente al C.D. San Isidro que alcanzan profundidades de 1.5 metros. Finalmente, se observa la presencia de anomalías puntuales asociadas a tuberías y asentamientos próximos a la bajada de Los Delfines.

**Línea GPR7-SI:** Realizada en el interior del parque bicentenario, con una longitud de 240 metros y orientada NO a SE. En la línea se identifica la existencia de una capa de 1.0 metro de espesor compuesta por material heterogéneo. Asimismo, en la parte inicial del parque Bicentenario se presentan grietas que alcanzan profundidades de 1.0 metro, así como la presencia de asentamientos próximos a la Calle Godofredo García.

**Línea GPR8-SI:** Realizada en el exterior del parque Bicentenario, paralelo al acantilado, con una longitud de 143 metros y orientada en dirección NO a SE. En la línea se identifica la presencia de una capa de

material heterogéneo de 1 metro de espesor y que cerca de la bajada Los Delfines alcanza los 2 metros con la creencia de grietas de 1 metro de profundidad. Otras anomalías indican la presencia de material suelto y asentamientos.

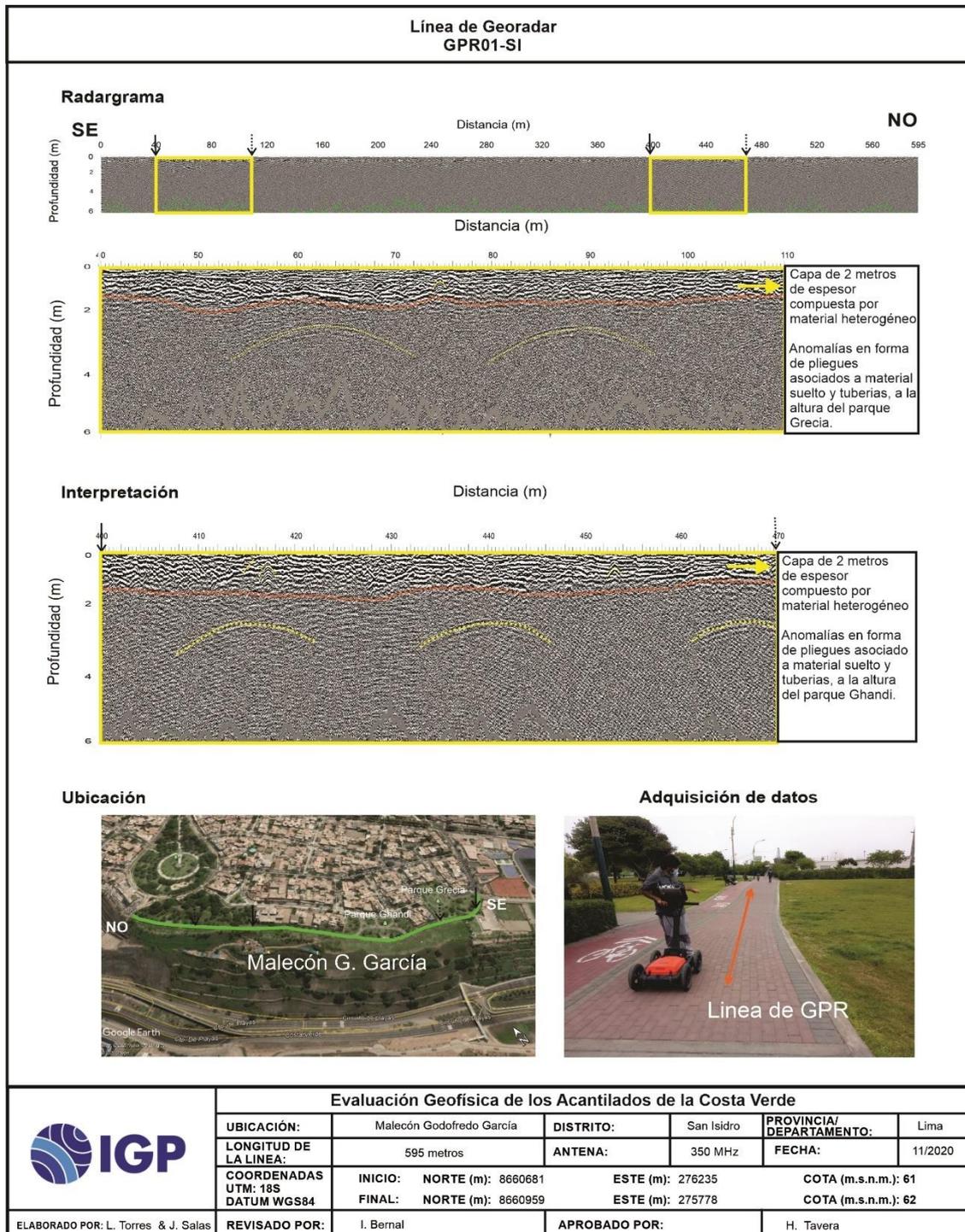


Figura 24. Resultados obtenidos con la técnica de georadar para la línea GPR1-SI.

**Línea GPR09-SI:** Realizada en el parque la Pera con una longitud de 339 metros y orientada en dirección SO a NE (perpendicular al acantilado). En la línea se identifica la presencia de una capa de 1 metro de espesor compuesto por material heterogéneo; además de una grieta a 10 metros de longitud en el Malecón Godofredo García que alcanza una profundidad de 2 metros. Asimismo, se tiene anomalías puntuales que se asocian a cambios de materiales superficiales (veredas).

### **b) Interpretación**

Los radargramas obtenidos en el distrito de San Isidro permiten identificar la presencia, en el subsuelo, de una capa con espesores de 1.5 a 2 metros de espesor con diferentes propiedades físicas; además de la existencia de anomalías asociadas a grietas y asentamientos con las siguientes características:

- En el extremo norte del área de estudio, entre el parque de la Benemérita Guardia Civil (La Pera) y la Calle 2, se identificó la presencia de reflectores lineales con amplitudes que se incrementan en zonas con presencia de asentamientos, grietas o fisuras en el suelo, que desde la superficie; alcanzan los 2 metros de profundidad a la altura (Malecón Godofredo García y parque La Pera).
- Hacia la zona central, desde la Calle 2 hasta el Complejo Deportivo San Isidro, se identifica la presencia de grietas y asentamientos a la altura de los parques Gandhi y Grecia. Asimismo, en la calle Godofredo García, a la altura de la Estación de Bomberos, se observan en superficie la presencia de aberturas de hasta 5 centímetros de ancho que alcanzan profundidades de 0.5 a 1.0 metro.

- En el extremo sur, entre el Complejo Deportivo San Isidro y la Bajada Los Delfines (límite con el distrito de Miraflores), sobresale la presencia de pequeñas discontinuidades debido a la presencia de fisuras que alcanzan los 2.0 metros de profundidad; además de material suelto en la parte interior y exterior del parque Bicentenario.

Finalmente, a lo largo del acantilado se identifica la presencia de anomalías puntuales asociadas a elementos externos como los servicios de alcantarillado y buzones de agua, y otros que se asocian al cambio de material de asfalto a cemento.

## **2.5.- Método de razones espectrales (H/V)**

El método de razones espectrales (H/V) fue propuesto por Nakamura (1989) para caracterizar la respuesta dinámica 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 cada capa estratigráfica, de diferente espesor, geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes a la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.

### **2.5.1.- Adquisición de datos**

Durante la adquisición de datos en campo se recolectaron registros de vibración ambiental en 77 puntos utilizando sensores Lennartz y registradores CityShark II (Figura 25). Los datos corresponden a puntos que se distribuyen siguiendo 10 líneas perpendiculares al acantilado (perfiles) con longitudes del orden de 300 a 450 metros con intervalos de registro, entre punto y punto, de 40 a 50 metros (Figura 26). Cada registro de vibración ambiental, tiene una

duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de datos para su posterior análisis.



*Figura 25. Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensor Lennartz (2N) y registradores CityShark II.*

En la Figura 27, se muestra ejemplos de señales de vibración ambiental registrados en el punto ubicado en el cruce de la Av. Octavio Espinoza y calle Paul Harris. En estas señales se observa la presencia de ruido de poca amplitud y/o picos de amplitudes transitorias (SI07-09, suelos compactos), otro en el Malecón Godofredo García por el parque Grecia, sobre el acantilado con presencia de ruido de fondo continuo (SI05-03, suelos heterogéneos); y finalmente, otro ubicado en la Vía Circuito de Playas con presencia de altos niveles de ruido (SI01-08, suelos muy heterogéneos y/o rellenos). La correlación de las características físicas y dinámicas de estos suelos, permite poder clasificarlos y a la vez zonificar el área de estudio en base a la respuesta dinámica del suelo ante la sollicitación sísmica.

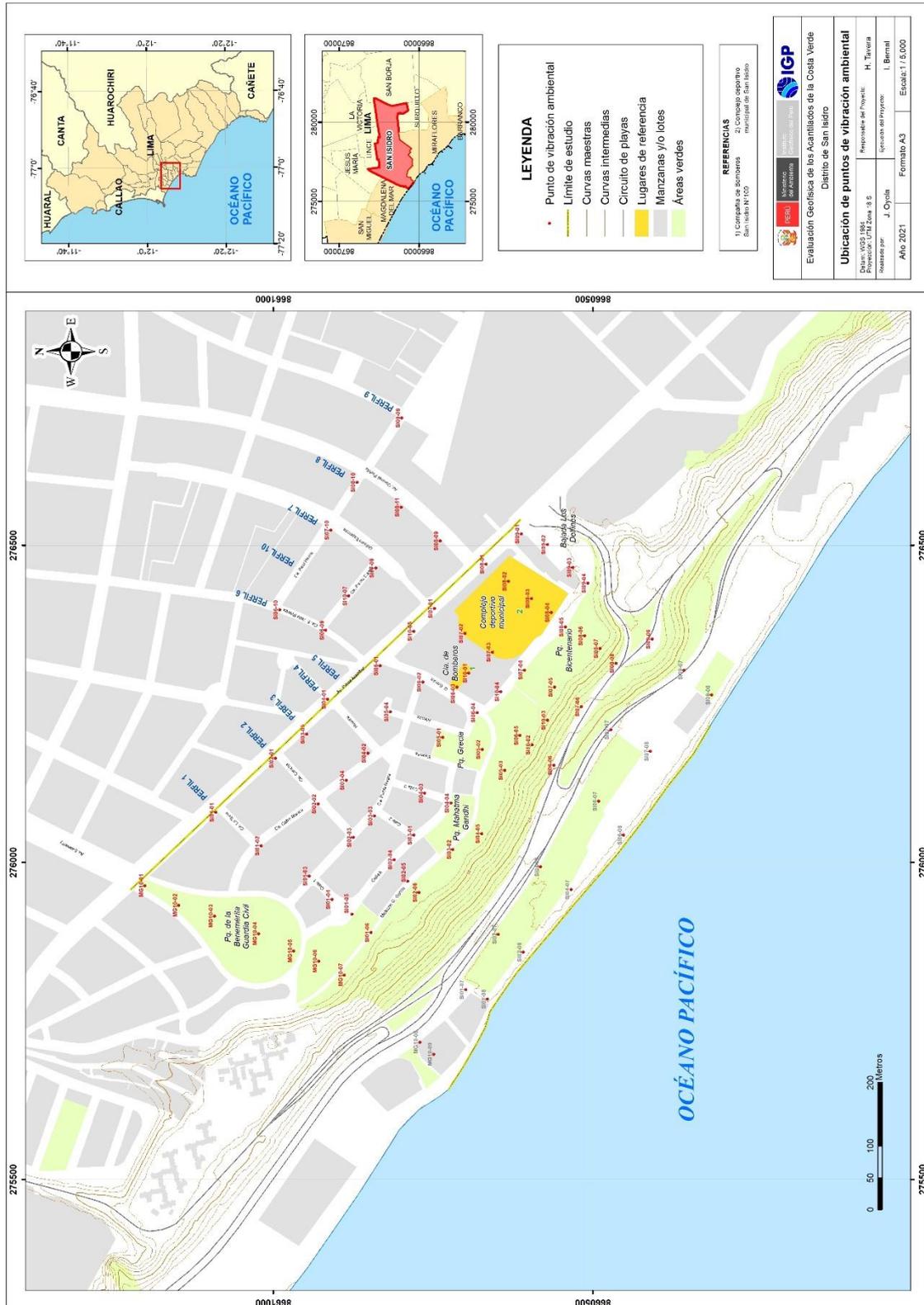


Figura 26. Distribución espacial de los puntos de registros de vibración ambiental, en los ACV del distrito de San Isidro. Los perfiles, consideran puntos distribuidos siguiendo líneas perpendiculares al acantilado. Los códigos en gris, corresponden a puntos realizados en la zona baja del acantilado.

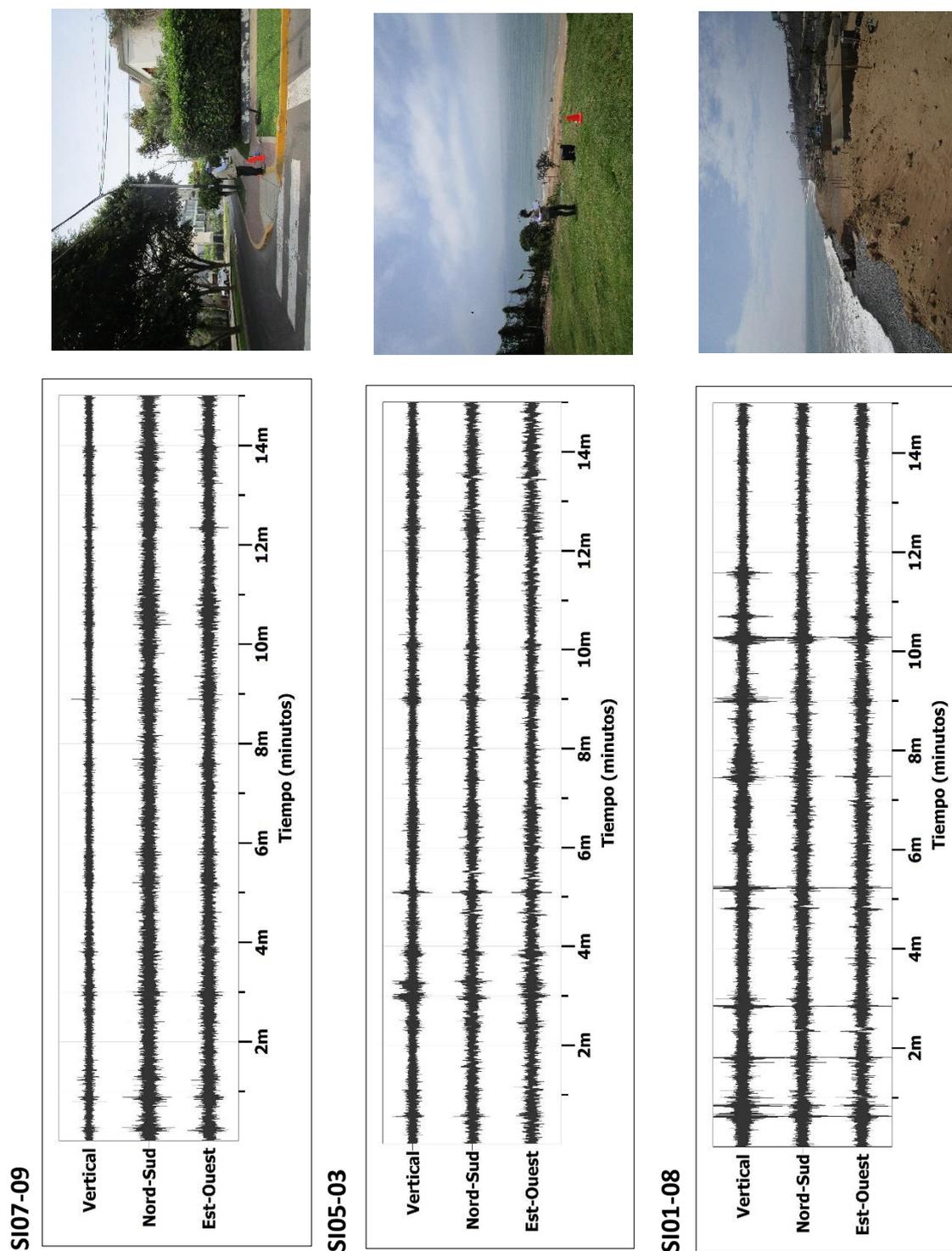


Figura 27. Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Registros obtenidos en el cruce de la Av. Octavio Espinoza y la calle Paul Harris con ruido transitorio (SI07-09); Malecón Godofredo García sobre el acantilado con ruido constante (SI05-03) y en la Vía Circuito de Playas (SI01-08). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

### **2.5.2.-Procesamiento y análisis**

Para aplicar la técnica de cocientes espectrales H/V se consideran los siguientes pasos:

- ✓ Los registros de vibración ambiental fueron tratados por ventanas de 20 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo. Para tal efecto, se selecciona de forma aleatoria diversos tramos de señal sin la presencia de ruidos transitorios.
- ✓ Se calcula la Transformada Rápida de Fourier para un número mayor a 10 ventanas de observación para cada punto, a fin de obtener los cocientes espectrales para cada componente de registro entre su componente vertical (E-O/V; N-S/V).
- ✓ Los espectros horizontales de la señal se dividieron entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego se promediaron estos para cada punto de observación considerando su respectiva desviación estándar.
- ✓ Se procedió a identificar la frecuencia predominante considerando un rango de interés que fluctúa entre 0.5 a 20 Hz y picos/rangos con amplificaciones relativas de al menos 2 veces (se considera la amplitud de "1" como punto de referencia), ver Figura 28.

Para el análisis de los datos obtenidos en campo fue necesario considerar los siguientes puntos:

- ✓ Las frecuencias predominantes menores a 1 Hz corresponden a vibraciones generadas por el oleaje del mar, y/o cambios meteorológicos (periodos muy largos).
- ✓ Las bajas frecuencias o periodos largos son debidas a la presencia de depósitos profundos en el subsuelo.

- ✓ Las frecuencias altas o periodos cortos son debidos a depósitos superficiales blandos y de poco espesor (SESAME, 2006; Bernal, 2006).
- ✓ Para la interpretación de los resultados obtenidos en este estudio, se consideró la información geológica, geomorfológica y geotécnica disponible para la zona de estudio.

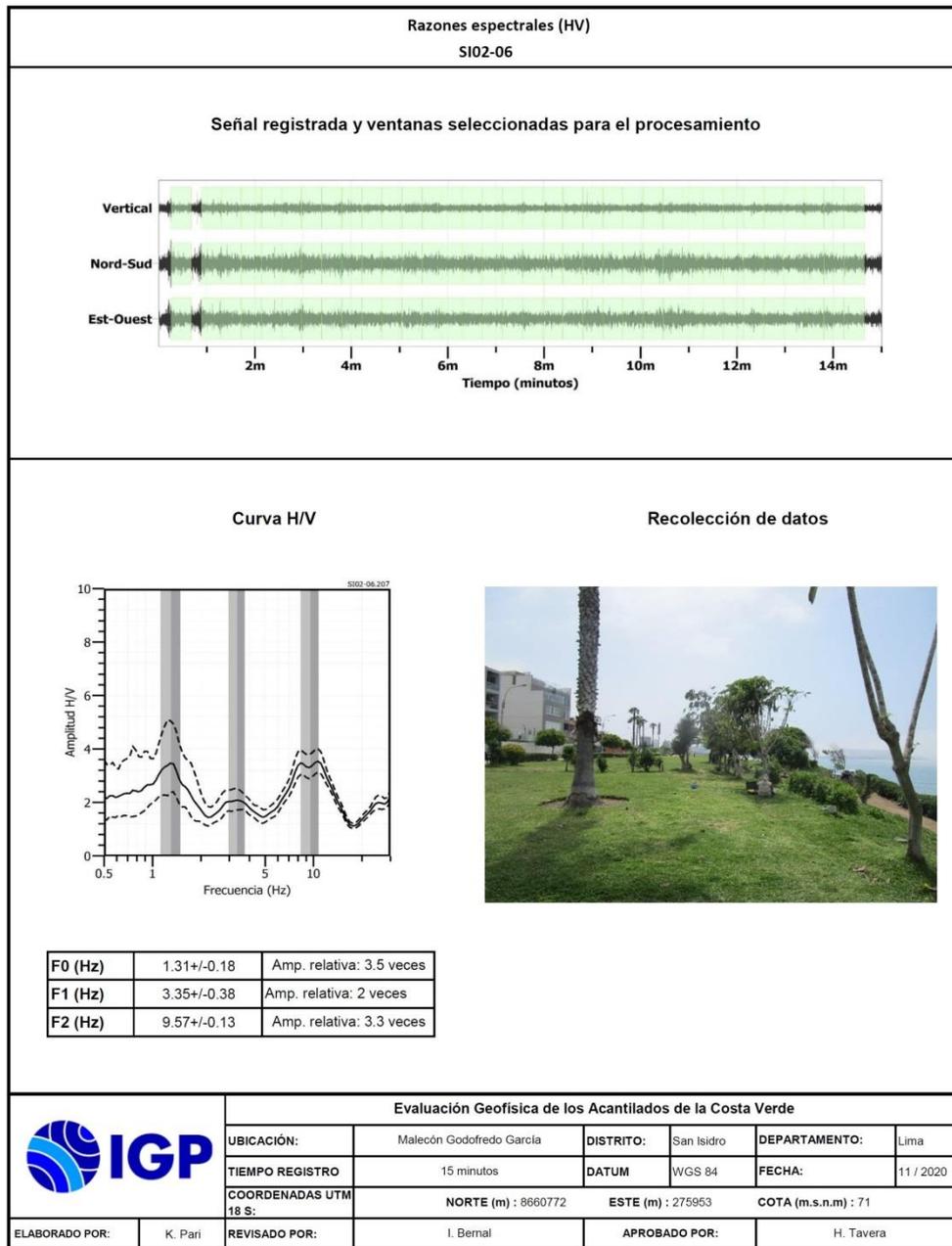


Figura 28. Resultados obtenidos con el método de razones espectrales (H/V) para el punto SI02-06. Arriba, la señal registrada y abajo la curva promedio de las razones espectrales (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en líneas discontinuas. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

### 2.5.3.- Resultados e interpretación

En los ACV del distrito de San Isidro, los suelos responden a dos rangos de frecuencias:  $F_0$  ( $F \leq 2.0$  Hz) y  $F_1$  ( $F > 2.0$  Hz); y su distribución espacial muestra que cerca del borde del acantilado prevalecen hasta tres picos de frecuencias bien definidos y conforme se avanza en dirección noreste (hacia el área urbana), aparece uno o dos picos de frecuencia con mínimas amplificaciones. Estas características sugieren que en las cercanías del acantilado los suelos son menos compactos y más heterogéneos.

- **Frecuencias predominantes  $F_0$ :** En la Figura 29 se muestra el mapa con la distribución espacial de los valores de  $F_0$  en el área del distrito de San Isidro y en ella se observa el predominio en de valores entre 0.70 a 1.60 Hz (0.6 - 1.4 segundos) representados por un pico de frecuencia. Estos valores de baja frecuencia estarían asociados a la presencia de estratos profundos de gran espesor presente en toda la terraza aluvial del ACV.

- **Frecuencias predominantes  $F_1$ :** En la Figura 30, se muestra la distribución espacial de los valores de  $F_1$  en el área del distrito de San Isidro y en ella se observa el predominio de valores entre 3.0 a 14 Hz (0.1 - 0.3 segundos). En general, para este rango de frecuencias las señales presentan amplificaciones mayores a 2 veces y dos picos de frecuencias en las cercanías del borde del acantilado debidos a la presencia de suelos heterogéneos depositados sobre estratos compactos. En la zona que corresponde al circuito de playas, se identifica que los suelos responden a un pico de frecuencia bien definido con valores entre 5.0 a 8.0 Hz y amplificaciones de hasta 9 veces, lo cual sugiere la presencia de suelos blandos.



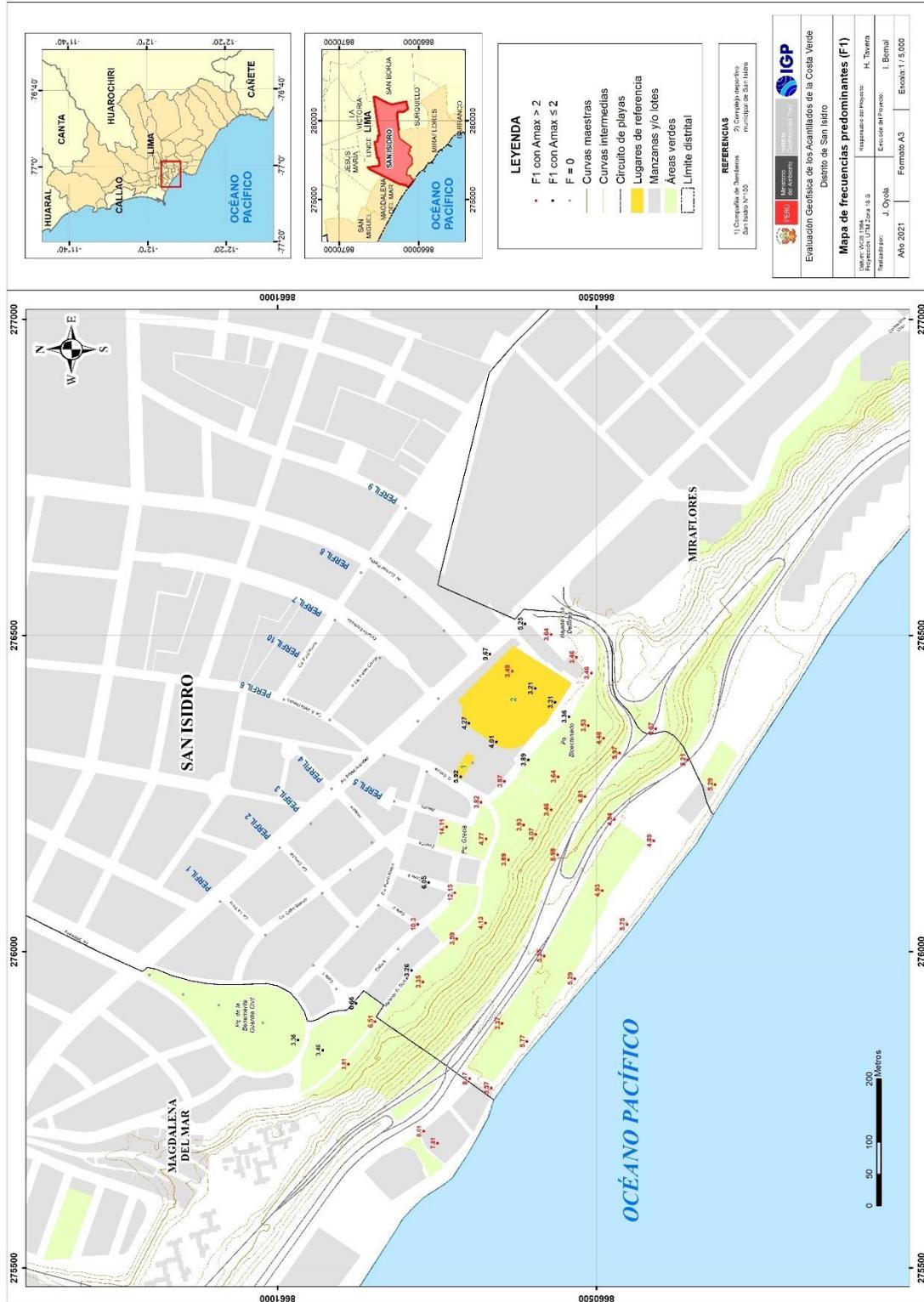


Figura 30. Distribución espacial de las frecuencias F1 ( $F > 2.0$  Hz). Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 2 veces.

En la Figura 31, se muestra ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos SI02-01, SI03-03 y SI06-02, ubicados el primero en la calle Carlos Concha con la Av. Pérez Aranibar, el segundo en la calle Punta Negra con la Calle 2 y el tercero en el cruce de las calles Godofredo García y Punta Negra, a más de 100 metros de distancia del borde del acantilado. En estos espectros sobresalen picos con frecuencias de 1.24, 1.46 y 1.40 Hz respectivamente y amplificaciones de 1.9, 1.6 y 1.6 veces; es decir, valores que sugieren la presencia de suelos mas compactos.

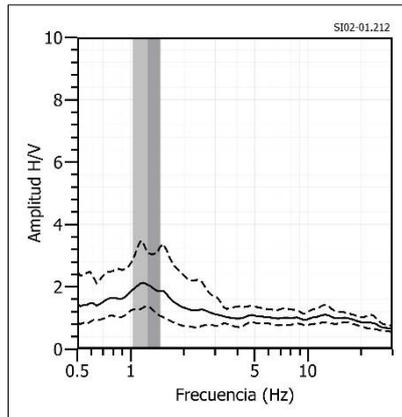
Por otro lado, y a fin de evaluar el cambio en el comportamiento dinámico del suelo a lo largo del ACV del distrito de San Isidro, se analiza de manera conjunta la información contenida en cada gráfico de razones espectrales (H/V) para los 10 perfiles perpendiculares al acantilado.

En la Figura 32a, se muestra los gráficos de razones espectrales correspondientes a puntos del perfil P-02, siendo sus características las siguientes:

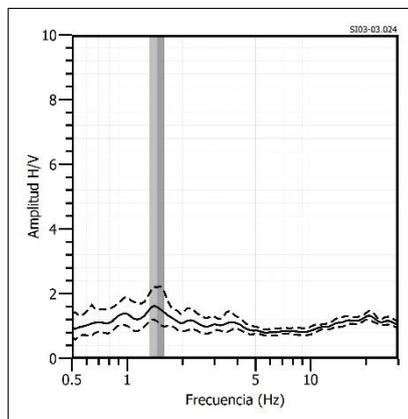
- En el punto SI02-03 ubicado a 100 metros del acantilado, no sobresale ningún pico de frecuencia, esto está relacionado con la presencia de suelos rígidos.
- En el punto SI02-06 ubicado al borde de acantilado, en el Malecón Godofredo García, se observa tres picos con frecuencias de 1.3, 3.3 y 9.5 Hz, y amplificaciones mayores a 2 veces.
- En el tercer punto, ubicado en el circuito de playas, sobresale un pico de frecuencia bien definido a 5.7 Hz con amplificaciones de hasta 8.5 veces.

Asimismo, en la Figura 32b, se muestra los gráficos de razones espectrales correspondientes a puntos del perfil P-07, siendo sus características las siguientes:

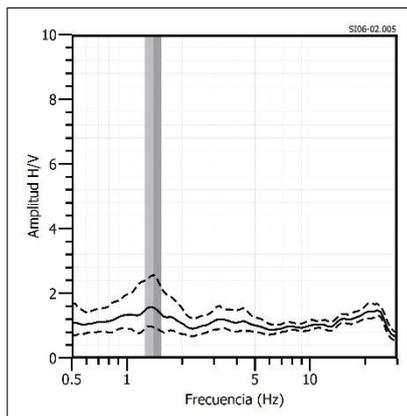
**SI02-01**



**SI03-03**



**SI06-02**



*Figura 31. Ejemplos de razones espectrales (H/V): puntos SI02-01, SI03-03 y SI06-02, ubicados en las calles Carlos Concha, Punta Negra y Godofredo García, a más de 100 metros de distancias del borde del acantilado. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.*

- El punto SI07-01 ubicado a 150 metros del acantilado, en el cruce de las avenidas Pérez Aranibar y Octavio Espinoza, sobresale un pico de frecuencia a 1.5 Hz, con amplificaciones de hasta 2 veces.
- En el punto SI07-05 ubicado sobre el acantilado, se observa tres picos a frecuencias de 1.4, 3.6 y 10.2 Hz con amplificaciones de mayores a 2 veces.
- En el tercer punto, ubicado en el circuito de playas, sobresale dos picos de frecuencia bien definidos a 1.2 y 4.9 Hz con amplificaciones de hasta 8.3 veces.

De acuerdo a este análisis, el número de picos de frecuencias, formas de las curvas y factores de amplificación relativa, muestran un cambio en el comportamiento dinámico del suelo a diferentes distancias del acantilado. A mayor distancia, el suelo responde a un pico de frecuencia con bajas amplificaciones evidenciando que los suelos son más estables, situaciones diferentes se observa en el borde del acantilado y en la Vía Circuito de Playas, donde los suelos se muestran más heterogéneos y poco compactos.

- **Periodos Dominantes:** Para presentar los resultados finales obtenidos con la técnica H/V se ha procedido a convertir los valores de frecuencias predominantes a periodos dominantes y para construir el mapa de periodos, se asignó a cada punto de medición un radio de confiabilidad de 10 metros, lo cual facilita los procedimientos seguidos para la zonificación de los suelos. Según la Figura 33, los periodos dominantes fueron separados en dos grupos, en color negro para periodos menores a 0.3 segundos y en gris para periodos mayores.

Los resultados muestran que los suelos en los ACV del distrito de San Isidro responden principalmente a dos rangos de periodos: Próximos al borde del acantilado, los suelos responden a más de dos picos con valores entre 0.1 - 1.4 segundos evidenciando la presencia de suelos heterogéneos

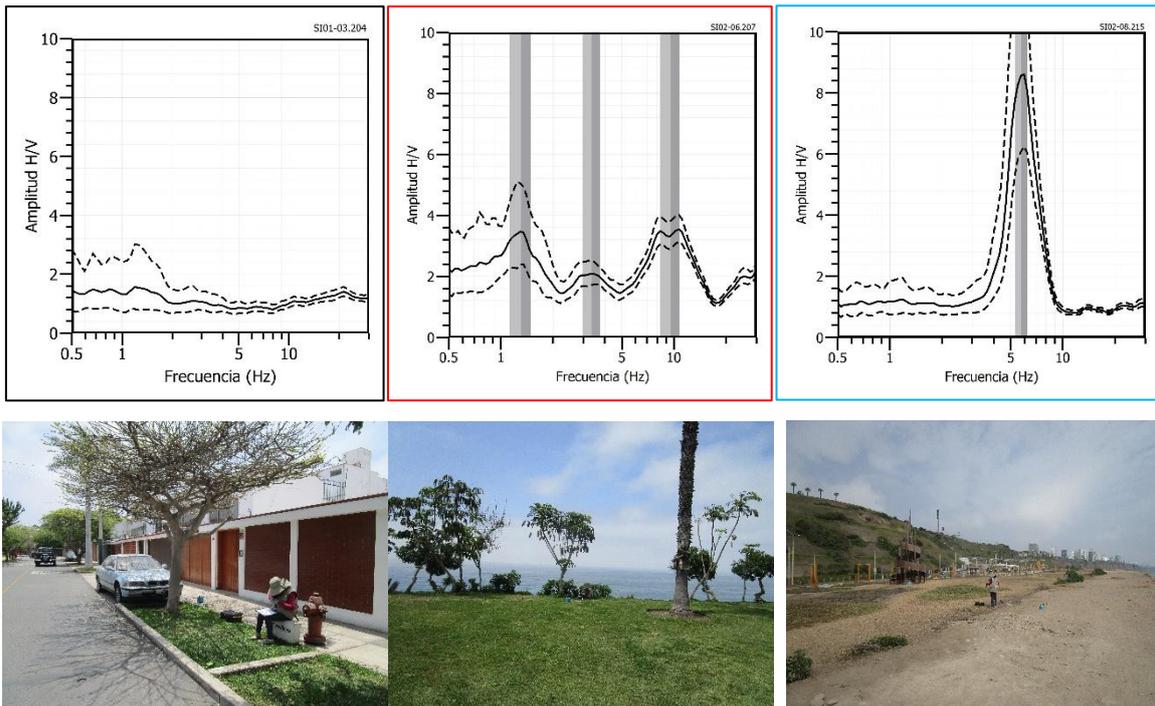


Figura 32. a) Razones espectrales obtenidas para puntos del perfil P-02 (SI02-03, SI02-06 y SI02-08), ubicados de Este a Oeste, a 100 metros del acantilado, a 5 metros y el tercero en el circuito de playas.

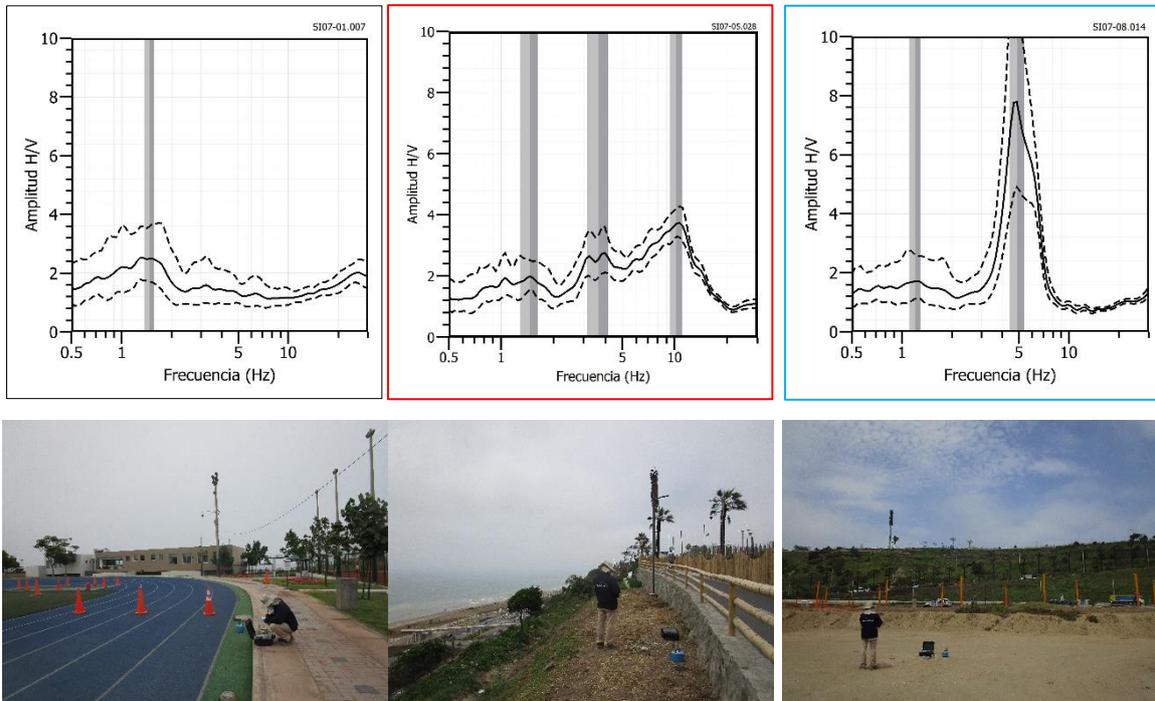


Figura 32. b) Razones espectrales obtenidas para puntos del perfil P-07 (SI07-01, SI07-05 y SI07-08), ubicados de Este a Oeste, a 150 metros del acantilado, sobre el acantilado y el tercero en el circuito de playas.

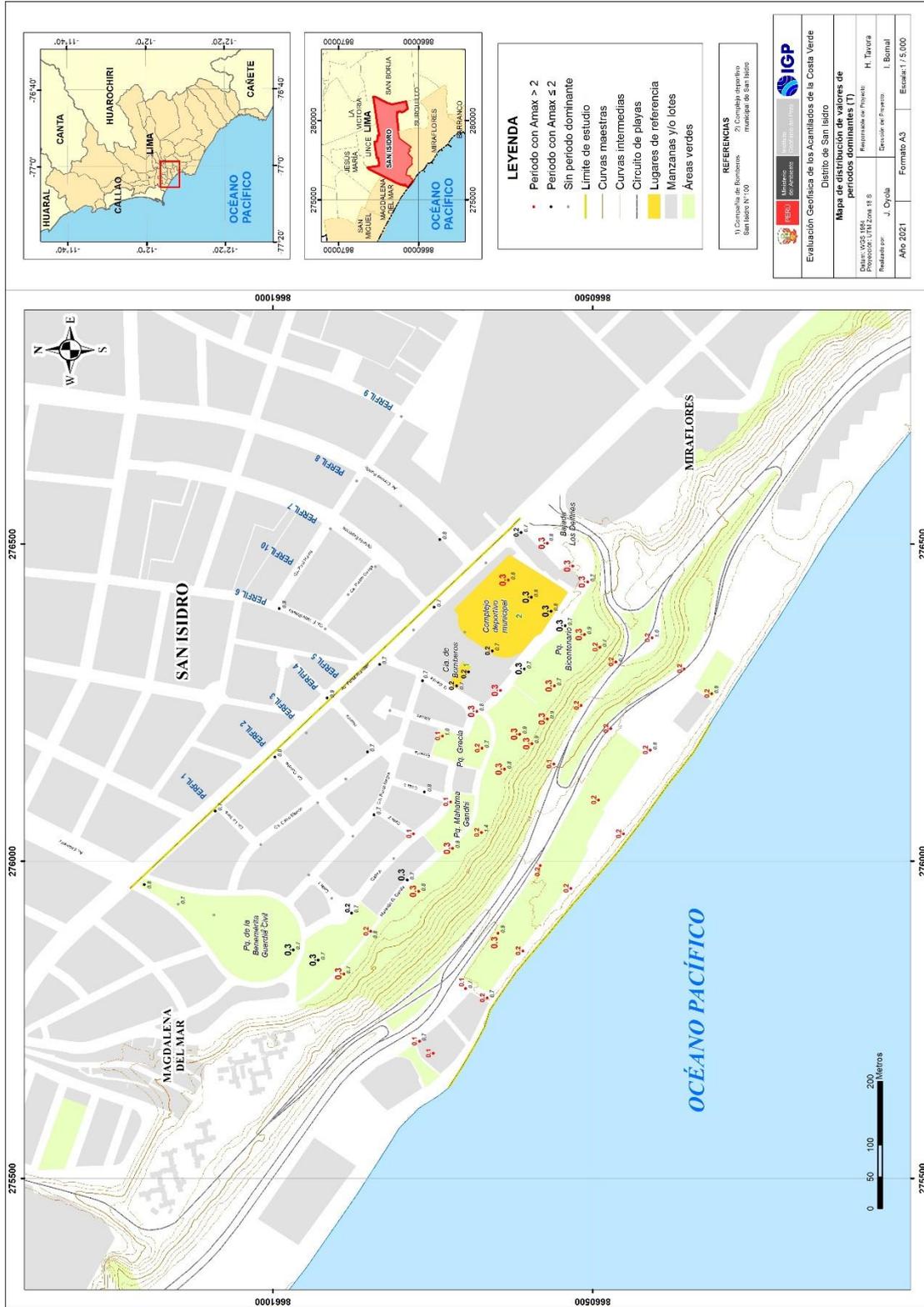


Figura 33. Distribución espacial de periodos dominantes del suelo para el distrito de San Isidro. Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 2 veces.

e inestables. A mayor distancia, en dirección este (área urbana), los suelos responden a un único pico de periodo que sobre una franja paralela al acantilado, los suelos del área central responden a periodos de 0.1 y 0.2 segundos, y hacia los extremos NO y SE a periodos de 0.3 segundos. A distancias mayores a los 100 metros del borde del acantilado, los suelos responden a mayores periodos (0.7 - 1.4 segundos) con bajas amplificaciones y en muchos casos, no se identifica ningún periodo, lo cual evidencia la presencia de suelos homogéneos en capas de mayor espesor.

## **2.6.- Método gravimétrico**

El método gravimétrico consiste en realizar mediciones del campo gravitacional terrestre para cuantificar e identificar las variaciones de densidad asociadas al aumento o disminución de la masa de las rocas y materiales en profundidad (Mironov, 1977). Se debe tener en cuenta que el valor de la gravedad en un determinado punto de observación, depende básicamente de 5 factores: latitud, elevación, topografía, mareas y las variaciones de densidad de los materiales del subsuelo. Estos factores se pueden corregir a fin de obtener las anomalías de gravedad y a partir de ella, los contrastes de densidad para identificar espesores de capas en el subsuelo, así como el tipo de material que las componen (Telford et al., 1990).

### **2.6.1.- Adquisición de datos**

En el área de estudio, se recolectaron 25 datos gravimétricos distribuidos en 2 líneas con longitudes de 574 y 431 metros; una orientada de manera perpendicular y la otra paralela al acantilado del distrito de San Isidro, siendo la distancia entre cada punto de medición fue de 50 metros en promedio (Figura 34).

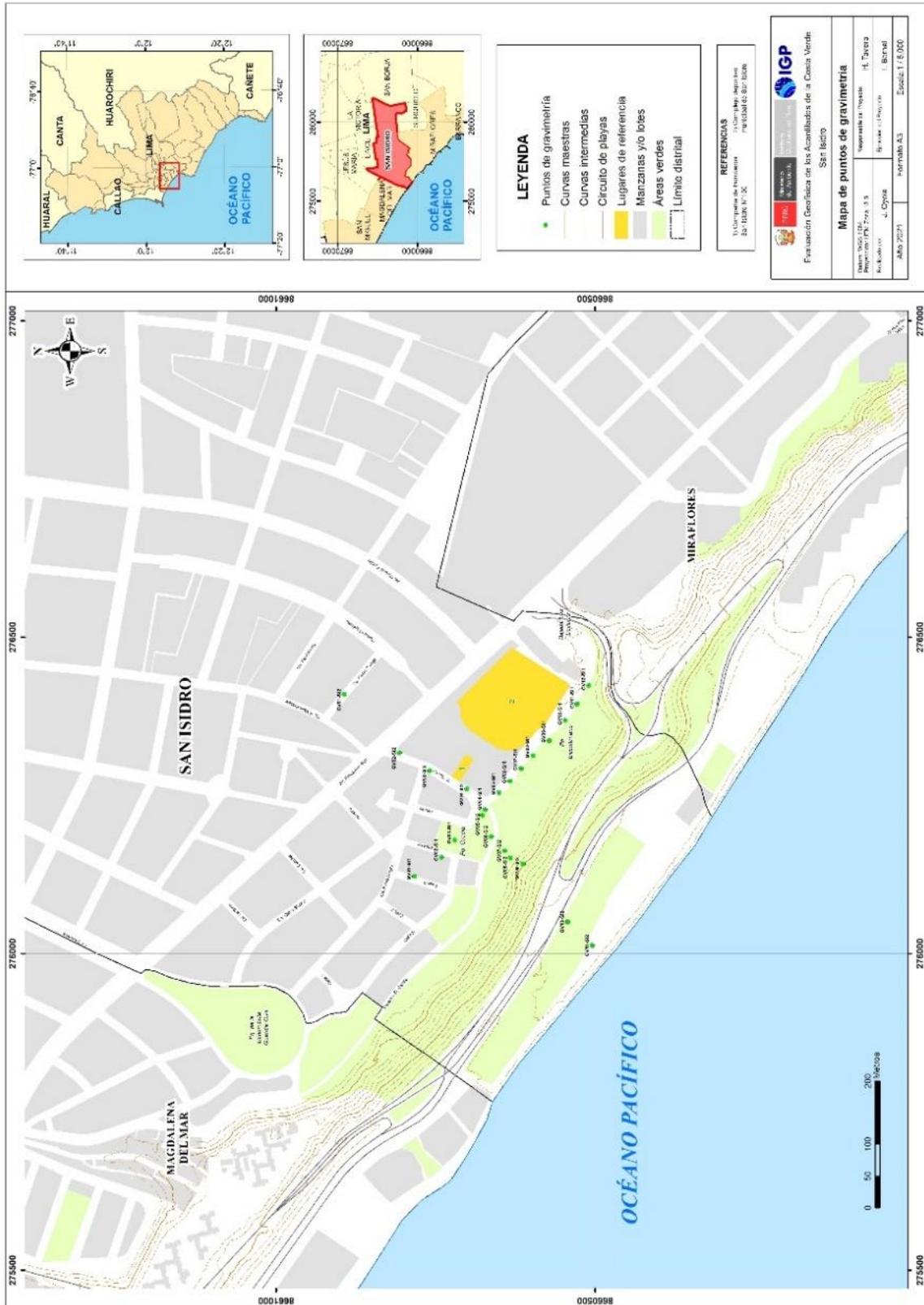


Figura 34. Distribución espacial de los puntos gravimétricos tomados en el acatilado del distrito de San Isidro.

Los valores de gravedad se registraron con un gravímetro LaCoste & Romberg de precisión  $\pm 0,01$  mGal, ver Figura 35. Asimismo, con la finalidad de disponer de coordenadas precisas de los puntos de medición se realizaron mediciones con equipos GNSS en modo estático en cada punto gravimétrico. Para realizar las correcciones a los datos obtenidos en el distrito de san isidro, se considera como punto de gravedad absoluta la estación de SAMI (978285.488 mGal), ubicada en el distrito de San Miguel (273478.1432 E, 8663109.829N y 56.75 metros de elevación).



*Figura 35. Para la corrección de los datos tomados en San Isidro se consideró la estación gravimétrica base SAMI (distrito de San Miguel).*

### **2.6.2.- Procesamiento y análisis**

Para conocer los valores de anomalías de Bouguer, los datos recolectados en campo fueron corregidos por latitud, marea, topografía, aire libre y por la corrección de Bouguer (Kane 1962; Nagy 1966). Para este objetivo se utilizó el software Oasis Montaj de Goesoft y un valor de densidad media para las rocas de  $2.67$  g/cm<sup>3</sup> (Hinze et al., 2005). Asimismo, para separar los efectos gravimétricos asociados a estructuras regionales más profundas (anomalía regional), de las estructuras locales y

superficiales (anomalía residual), se aplicó el filtro de continuación analítica ascendente (Geosoft; 2006).

Seguidamente, se realizó el análisis espectral de las residuales siguiendo la metodología propuesta por Spector (1968) y Grant (1970), para determinar en detalle, la profundidad de las anomalías. El método consiste en transformar, la grilla de la anomalía de residuales en el dominio del espacio, al dominio de frecuencias.

### **2.6.3.- Resultados e interpretación**

#### **a) Resultados**

En los perfiles gravimétricos, los valores de anomalías residuales varían de -0.3 a 0.2 mGal (Figura 36), estando los valores menores en el borde del acantilado, extremo sur del Malecón Godofredo García (Perfil SM01) y en el Complejo Deportivo de la municipalidad de San Isidro (Perfil SM02), lo cual sugieren la presencia de capas de mayor espesor compuestas por material heterogéneo. Los valores altos (0.2 mGal) están presentes en la parte baja del acantilado, por la Vía Circuito de playas (Perfil SM01) y hacia el extremo sur del parque Bicentenario (Perfil SM02), indicando que los suelos, a nivel superficial, presentan mayor compactación.

Seguidamente, utilizando como datos de entrada los valores de anomalía residual de Bouguer y la topografía local del área de estudio, se elaboraron dos perfiles gravimétricos (SI01 y SI02) haciendo uso del módulo GM-SYS del software Oasis Montaj.

**Perfil gravimétrico SI01:** En la Figura 37 se observa que las variaciones de la anomalía residual reflejan cambios en la densidad de los

materiales en profundidad (puntos negros). El perfil obtenido define la existencia de suelos distribuidos en tres capas:

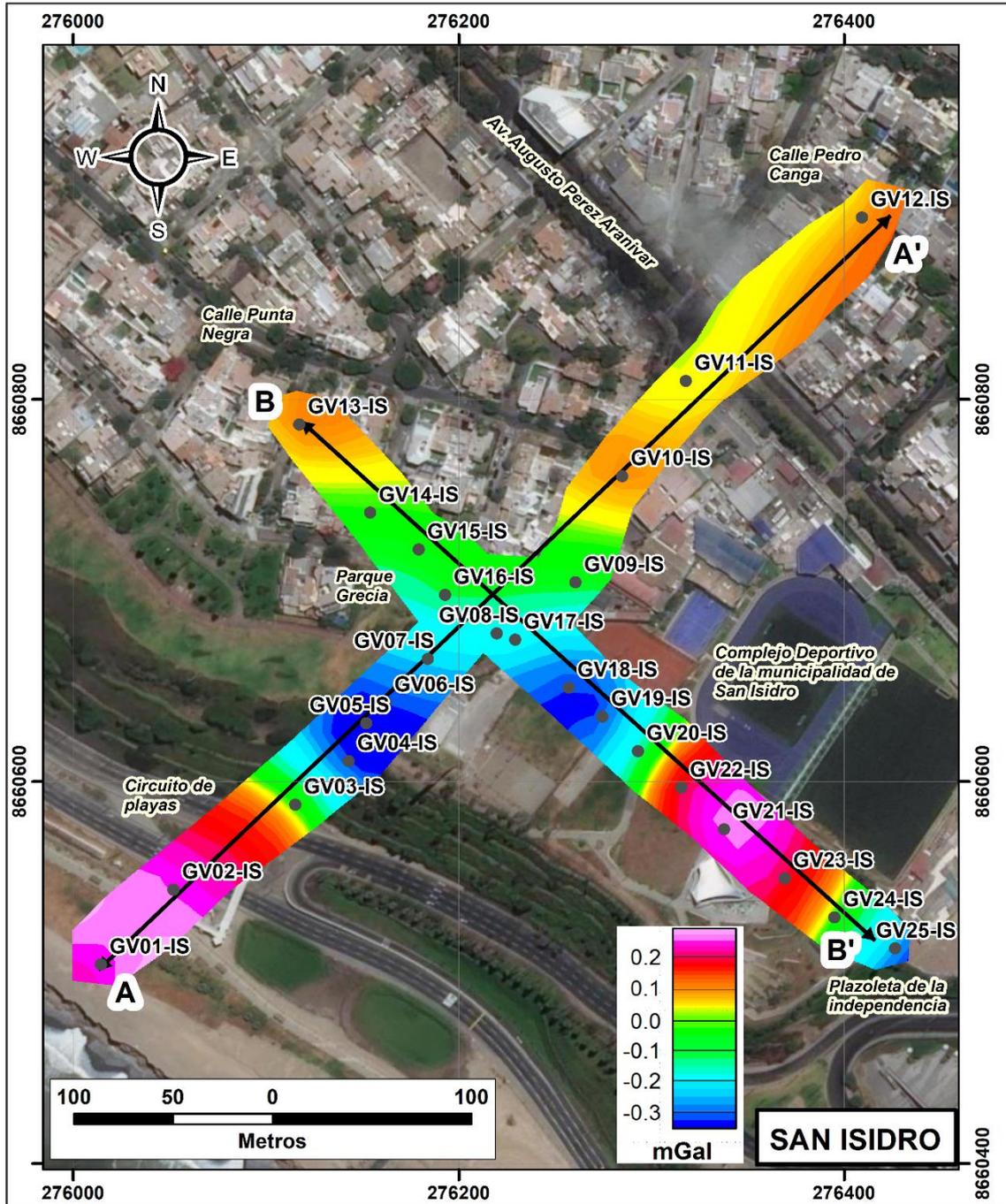


Figura 36. Mapa de anomalía residual de Bouguer, Los perfiles A-A' y B-B' corresponden a los perfiles S101 y S102, que cruzan el Parque Grecia y parque Bicentenario, respectivamente.

- La primera capa presenta espesores que varían desde 5 metros en las proximidades de la calle Conga hasta 14 metros en su extremo SO, cerca del Circuito de playas. Estos materiales presenta bajas densidades,  $1.6 \text{ gr/cm}^3$ .
- La segunda capa presenta una densidad de  $1.9 \text{ gr/cm}^3$  y espesores de 15 a 25 metros.
- La tercera capa presenta una densidad  $2.3 \text{ gr/cm}^3$  con espesores que varían desde 10 hasta 31 metros.

Por último, el perfil sugiere la existencia en profundidad, de una capa compuesta por material gravoso de espesor indeterminado. Estos suelos presentan una densidad mayor, de  $2.5 \text{ gr/cm}^3$ .

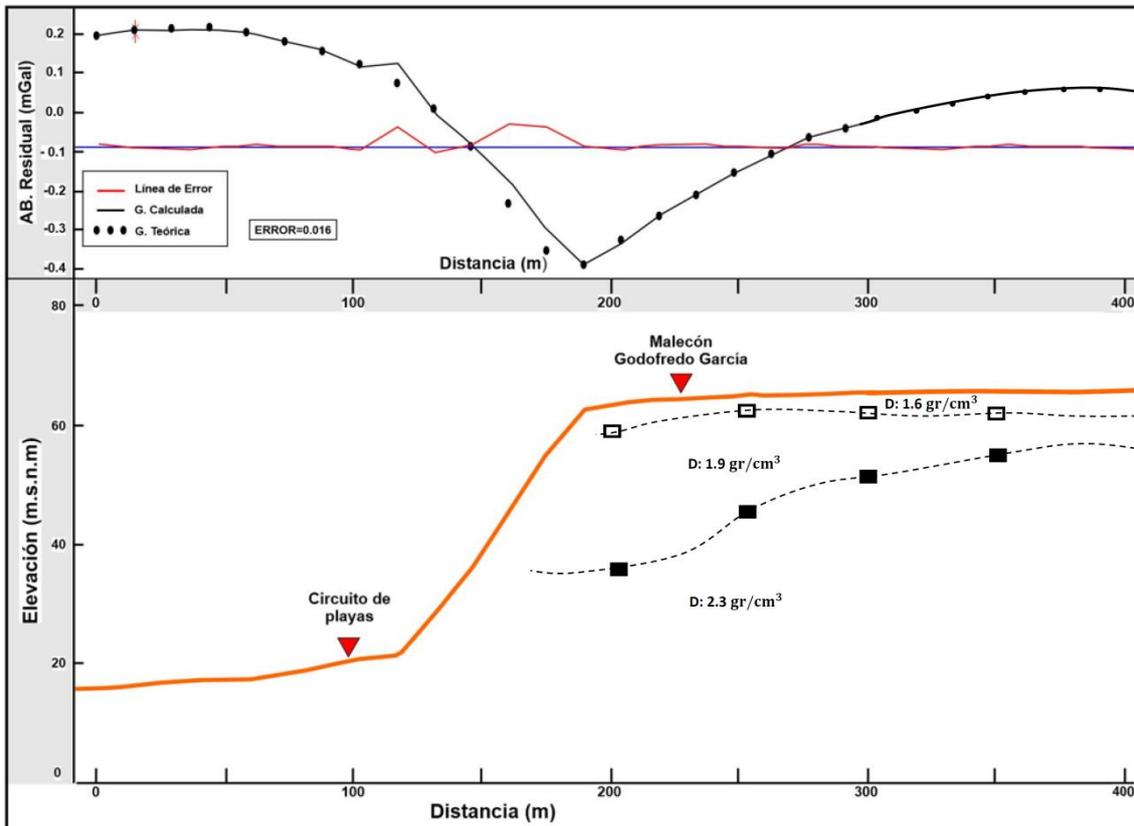


Figura 37. Perfil gravimétrico SI01 con orientación suroeste-noreste. En el extremo superior, los puntos representan la gravedad observada y la curva negra la gravedad calculada. En el extremo inferior se muestra el perfil gravimétrico propuesto.

**Perfil gravimétrico SI02:** En la Figura 38 se observa que las variaciones de la anomalía residual reflejan cambios en la densidad de los materiales en profundidad (puntos negros). El perfil sugiere que el subsuelo está conformado por tres capas:

- La primera capa presenta una densidad de  $1.6 \text{ gr/cm}^3$  con espesores que varían desde 10 a 20 metros de profundidad.
- La segunda capa presenta una densidad de  $1.9 \text{ gr/cm}^3$ , y espesores que varían de 7 a 19 m de espesor, siendo mayor en el CD de la municipalidad de San Isidro y de menor espesor cerca al estadio.
- La tercera capa tiene una densidad de  $2.3 \text{ gr/cm}^3$  y un espesor de 18 a 28 metros.

Finalmente, el perfil sugiere la presencia de una capa de espesor indeterminado con valores de densidad mayores a  $2.5 \text{ gr/cm}^3$ .

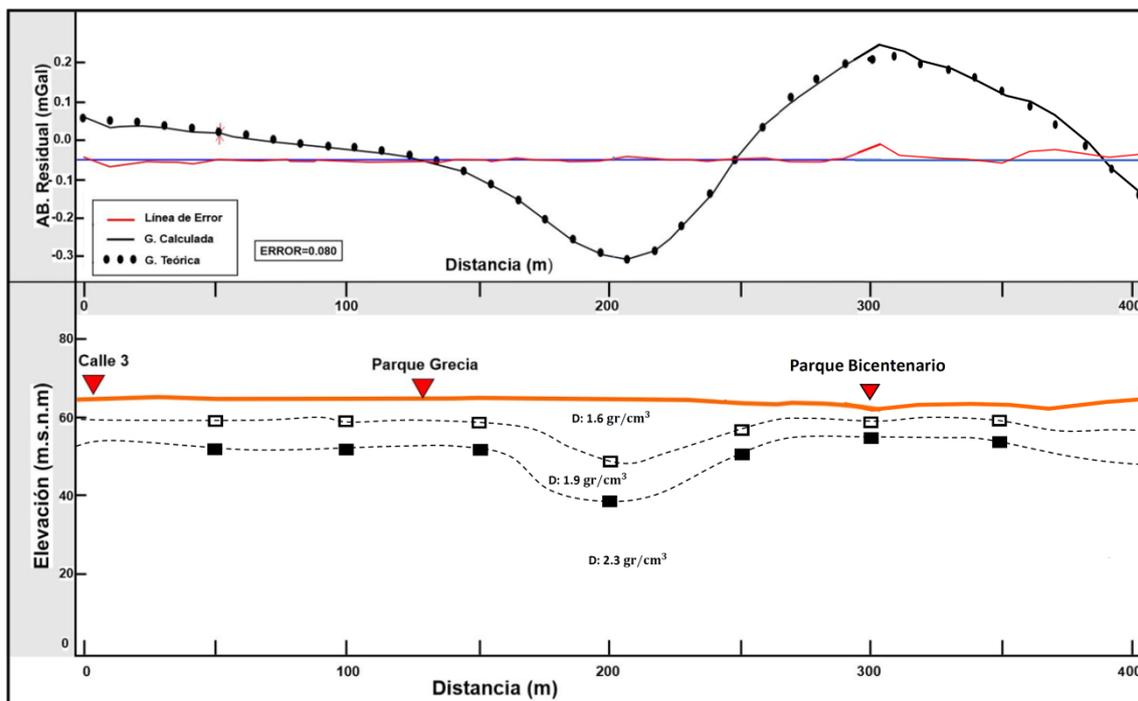


Figura 38. Sección gravimétrica SI02, orientada de noroeste-sureste. En el extremo superior, los puntos representan la gravedad observada y la curva negra la gravedad calculada. En el extremo inferior se muestra el perfil gravimétrico propuesto.

## **b) Interpretación**

Los resultados obtenidos en los perfiles gravimétricos fueron correlacionados con los obtenidos en los estudios de refracción sísmica, MASW, tomografía eléctrica y HV. En los ACV del distrito de San Isidro, se ha identificado la existencia en el subsuelo, de tres capas con espesores bien definidos y valores de densidad que se incrementan gradualmente en profundidad de 1.6 a 2.3 gr/cm<sup>3</sup>. La primera capa con espesores que varían entre 5 y 20 metros con bajas densidades y compuesta por materiales heterogéneos poco compactos. La segunda capa con espesores de 7 a 25 metros y la tercera con espesores de 10 a 31 metros; ambas constituidas por gravas y conglomerados consolidados. Estos materiales incrementan su densidad con la profundidad.

### **3. CARACTERIZACION FÍSICA DEL SUBSUELO Y SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO**

La exploración de la estructura y caracterización física del subsuelo de los ACV del distrito de San Isidro fue realizada usando datos e información generada con la aplicación de métodos geofísicos y su correlación con la información geológica, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

#### **3.1. Estructura del subsuelo**

El área urbana del distrito de San Isidro se asienta sobre una terraza conformada por depósitos aluviales y cuyo cambio topográfico más resaltante lo conforma los Acantilados de la Costa Verde. Para conocer las características físicas de los ACV se ha recolectado datos geofísicos en la parte alta del acantilado (velocidades de ondas longitudinales -  $V_p$ , perfiles unidimensionales de ondas de corte -  $V_s$ , secciones geoelectricas, radargramas y curvas de razones espectrales) considerando tendidos lineales que han sido distribuidos de manera estratégicamente para conocer los espesores y densidades de los diferentes materiales que conforman el subsuelo hasta una profundidad del orden de 60 metros.

En base a los resultados obtenidos, los ACV del distrito de San Isidro han sido divididos en 3 sectores con características físicas similares y que son descritas a continuación:

#### **Extremo norte**

*Entre el parque de la Benemérita Guardia Civil y la Calle 2 (Figura 39), se ha identificado en el subsuelo la presencia de 3 capas:*

- *La primera capa con 5 metros de espesor está constituida por materiales aluviales sueltos a medianamente compactos ( $V_s = 207$  m/s;  $V_p = 454$  m/s). Los suelos presentan moderado contenido de humedad que se incrementa hacia la zona de pendiente, encontrándose a nivel superficial material alóctono y/o rellenos de baja a moderada compactación.*
- *La segunda capa está constituida por material heterogéneo y aluvial medianamente compacto ( $V_s=421$ m/s;  $V_p= 815$  m/s) con espesores de hasta 10 metros. Estos suelos presentan de moderado a bajo contenido de humedad.*
- *Tercera capa está constituida por material compacto ( $V_s=553$  m/s;  $V_p=> 1247$  m/s) con espesores que superan los 13 metros. Estos suelos están conformados por gravas y finos con alto contenido de humedad.*

*En este sector, a nivel superficial se ha identificado la presencia de grietas asociadas a asentamientos del suelo hasta profundidades de 2 metros. La morfología del terreno muestra la heterogeneidad de los suelos en profundidad, principalmente cerca del borde del acantilado, A mayor distancia, hacia el área urbana, los suelos moderadamente consolidados disminuyen en espesor y se muestran más compactos.*

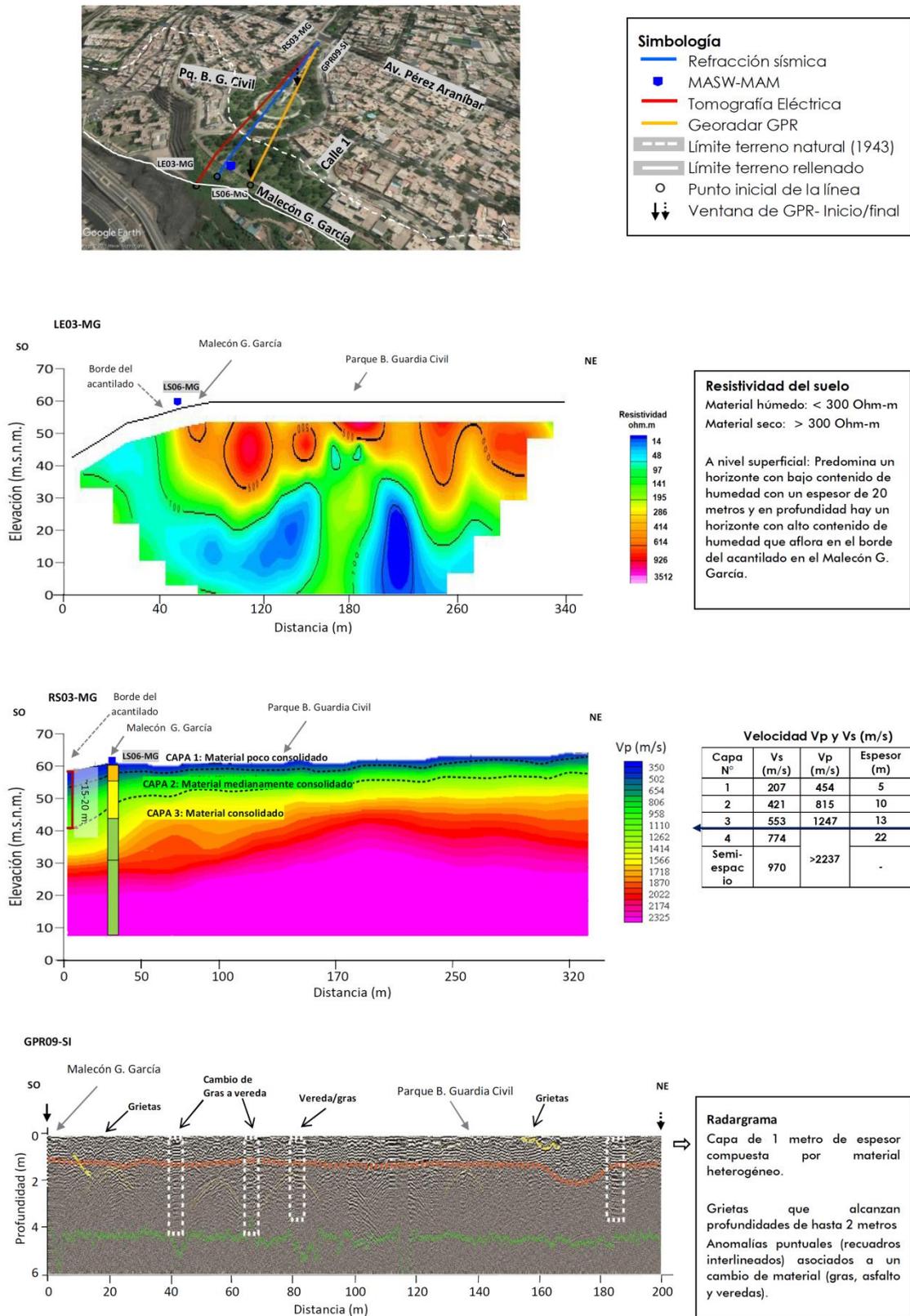


Figura 39. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos de tomografía eléctrica, refracción sísmica, MASW-MAM y georadar para el extremo Norte del distrito de San Isidro (Parque B. Guardia Civil).

## Zona central

*Entre la Calle 2 y el Complejo deportivo de San Isidro (Figura 40), se ha identificado la presencia en el subsuelo de 3 capas con las siguientes características:*

- La primera capa está constituida por material de heterogéneo y/o rellenos ( $V_s = 304$  m/s;  $V_p = 774$  m/s) con espesores de hasta 4 metros por la Compañía de Bomberos. Hacia el borde del acantilado, el espesor de la capa se duplica y presenta suelos con alto contenido de humedad que disminuye notablemente hacia el extremo NE de la calle Godofredo García.*
- La segunda capa está constituida por material aluvial compacto ( $V_s=567$  m/s;  $V_p=924$  m/s) con espesores de hasta 6 metros. Estos suelos presentan moderado a alto contenido de humedad y están compuestos por gravas y finos de mediana compactación.*
- La tercera capa de hasta 9 metros de espesor, está constituida por material heterogéneo de moderada compactación ( $V_s=491$  m/s;  $V_p > 1292$  m/s) y conformado por gravas, con alto contenido de humedad. A mayor profundidad, se observa el incremento en la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$  de 780 a 870 m/s) indicando la presencia de suelos húmedos en una capa de 30 metros de espesor.*

*En este sector, se ha identificado la presencia de asentamientos de suelos con grietas paralelas al acantilado con profundidades de hasta 1.5 metros. Estos escenarios indican la presencia de suelos heterogéneos y poco compactos a nivel superficial. A mayor distancia hacia el área urbana, los suelos son compactos y están compuestos por material aluvial gravoso con alta rigidez.*

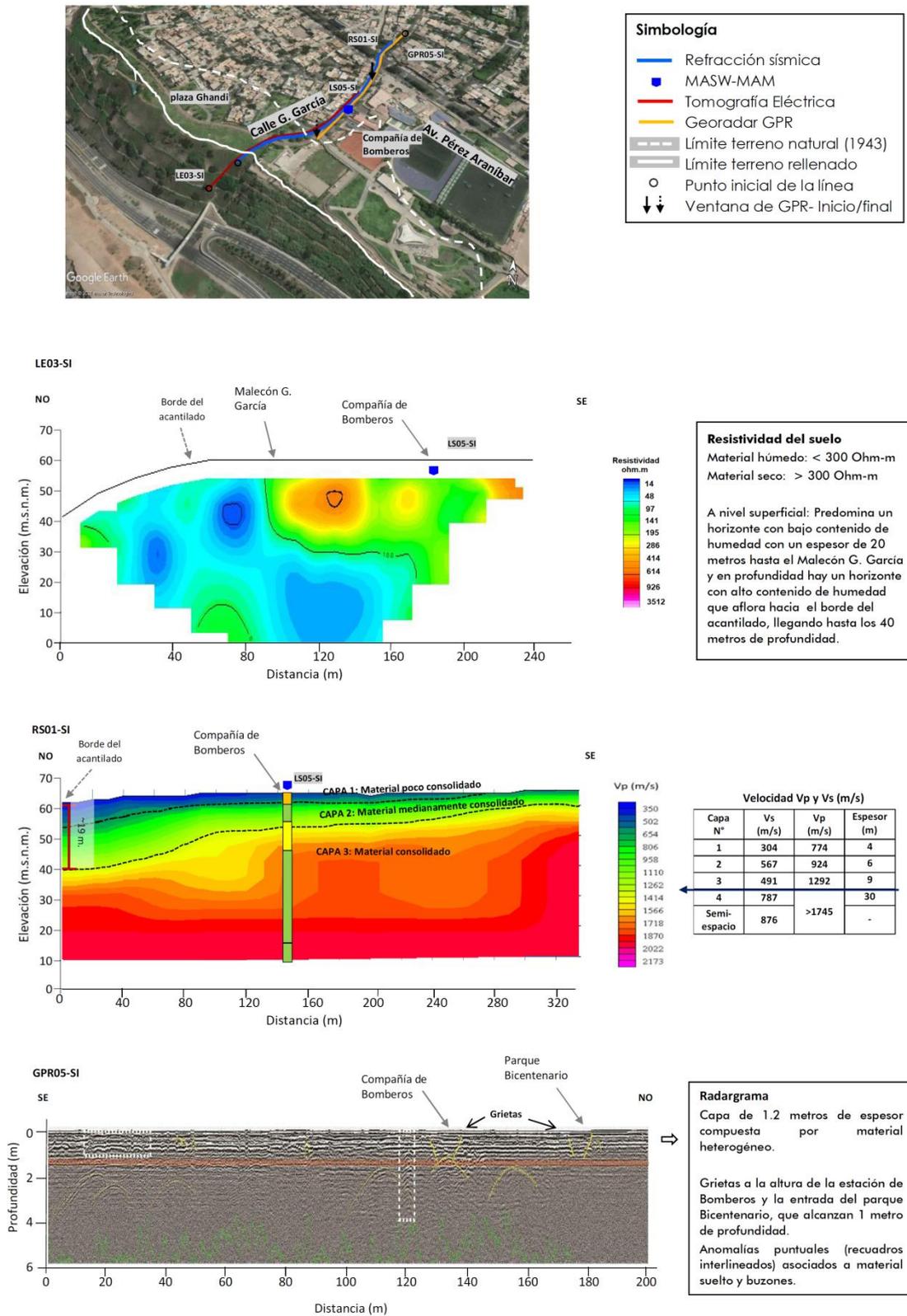


Figura 40. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos de tomografía eléctrica, refracción sísmica, MASW-MAM y georadar para el sector central del distrito de San Isidro (Calle 2 y Complejo Deportivo San Isidro).

## **Extremo sur**

*Entre el Complejo Deportivo de la Municipalidad de San Isidro y la Bajada Los Delfines (Figura 41), se han identificado en el subsuelo la presencia de 3 capas con las siguientes características:*

- *La primera capa está conformada por materiales aluviales sueltos medianamente compactos ( $V_s = 285$  m/s;  $V_p = 484$  m/s) y con espesores de hasta 5 metros. Estos suelos presentan diferentes niveles de humedad y están presentes en el acantilado.*
- *La segunda capa está constituida por materiales aluviales medianamente compactos ( $V_s=463$  m/s;  $V_p= 727$  m/s) con espesores de hasta 12 m. Estos suelos presentan moderado contenido de humedad.*
- *La tercera capa de 19 metros de espesor corresponde a un estrato compacto ( $V_s=627$  m/s;  $V_p \geq 1410$  m/s) por estar conformado por gravas con alto contenido de humedad en diversos sectores. A mayor profundidad se observa el incremento en la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$  de 750 a 830 m/s) y la presencia de suelos húmedos con espesores de 20 metros.*

*En este sector y a niveles superficiales, se identifica la presencia de asentamientos en el suelo con desniveles de hasta 2 metros y grietas con profundidades de 1.0 metro, hacia el extremo SE del área de estudio (bajada Los Delfines) y próximos al borde del acantilado. Estas características del suelo muestran su alta heterogeneidad a niveles superficiales.*

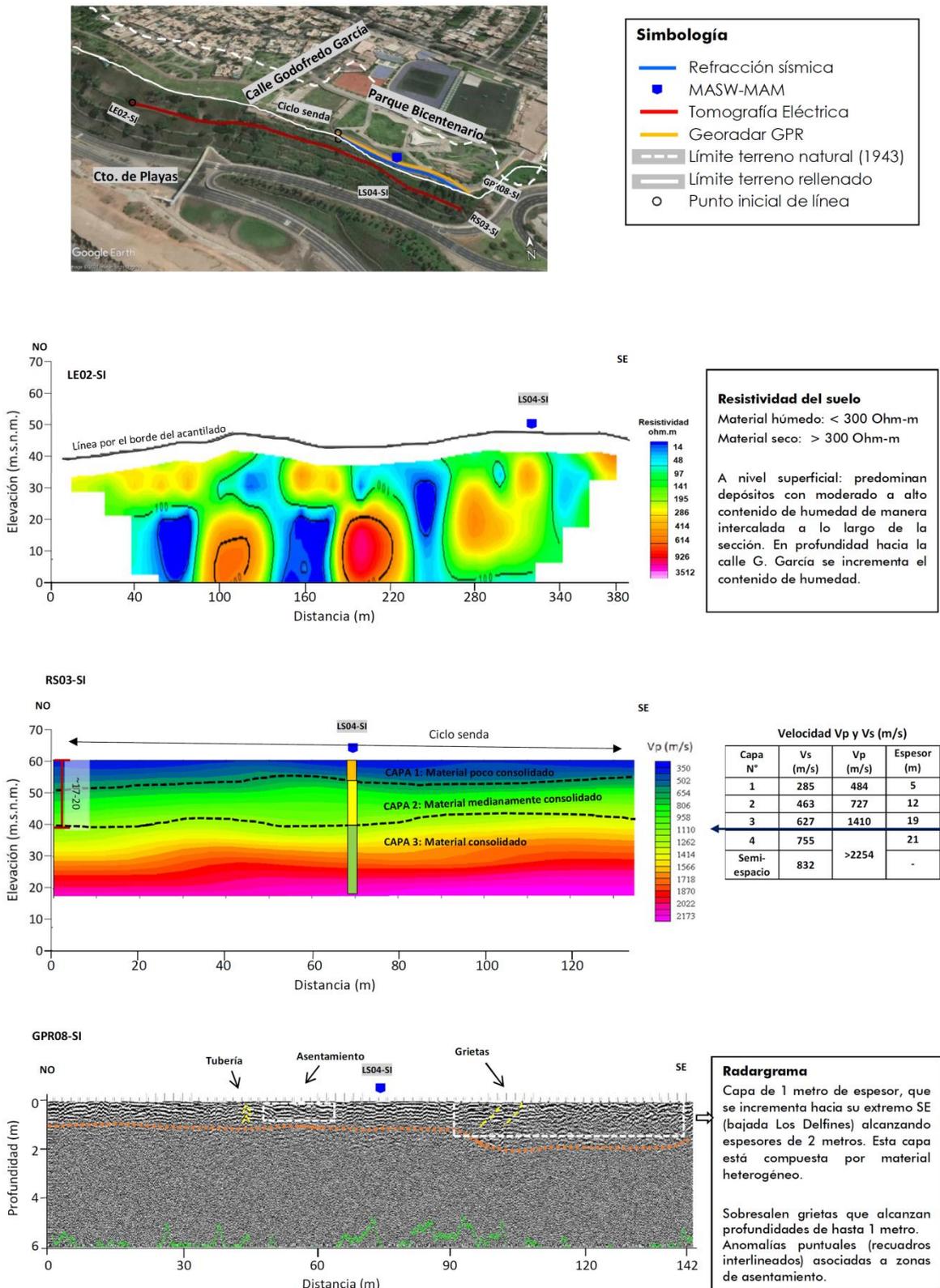


Figura 41. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos de tomografía eléctrica, refracción sísmica, MASW-MAM y Georadar para el extremo Sur del distrito de San Isidro (Complejo Deportivo San Isidro y Bajada los Delfines).

En general, en el distrito de San Isidro, en dirección perpendicular al acantilado, se ha identificado que los suelos presentan dos capas ( $V_s < 500$  m/s) con similar composición y comportamiento dinámico, y en conjunto sus características son (Figuras 42):

- A 10 metros del acantilado, la capa de material heterogéneo presenta un espesor promedio de 20 metros a lo largo de todo el Malecón Godofredo García.

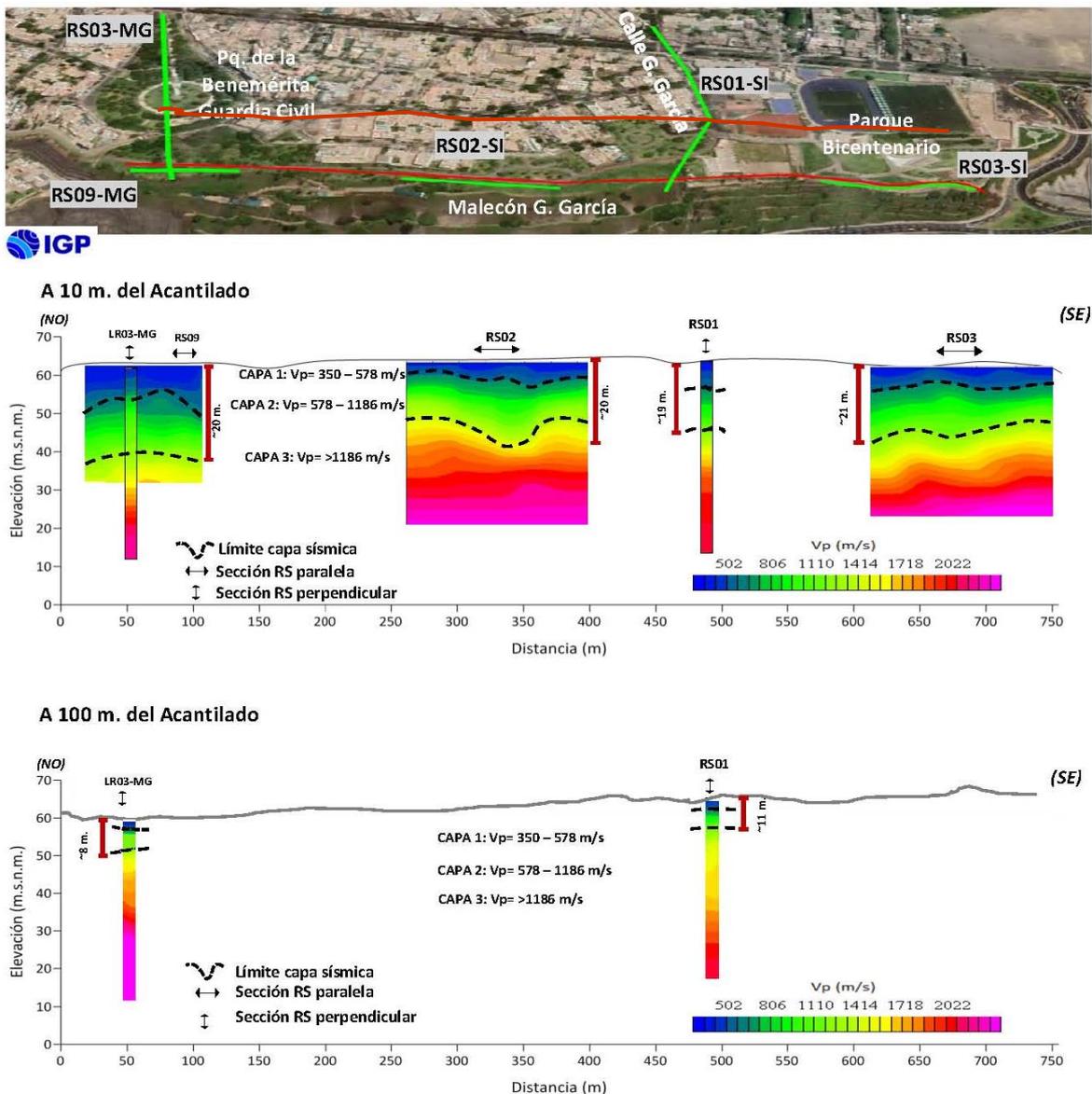


Figura 42. Variación en el espesor de las capas de suelos desde el borde del acantilado hasta distancias de 10 y 100 metros hacia el área urbana. Resultados obtenidos con el método de refracción sísmica (RS01-SI, LR03-MG).

- A los 100 metros, la capa de material heterogéneo presenta un espesor en promedio de 10 metros, tanto en el parque de la B. Guardia Civil como en la calle Godofredo García.

De acuerdo a lo indicado, en el extremo norte y a una distancia de 100 metros hacia el área urbana, el espesor de la capa disminuye de 20 a 8 metros; mientras que, en los extremos sur y centro, el espesor disminuye de 21 a 11 metros, evidenciando que los suelos menos estables se encuentran hacia el extremo sur del área de estudio.

Analizando las imágenes fotográficas frontales del acantilado y su correlación con los resultados obtenidos con los métodos sísmicos y de eléctrica, se distingue las dos capas superficiales y sus características son (Figura 43):

- A la altura del parque de la Benemérita Guardia Civil con el Malecón Godofredo García (límite con el distrito de Magdalena del Mar), se observa la presencia de un estrato de material heterogéneo (suelos de cultivo) emplazado sobre capas de grava y material fino. Según los resultados obtenidos con el método sísmico ( $V_s < 500\text{m/s}$ ), en las dos primeras capas predominan materiales sueltos a medianamente compactos con un espesor promedio de 17 a 20 metros. Este material presenta moderado contenido de humedad y a nivel superficial, se correlacionan con los sectores que presentan mayor contenido de humedad, como son las zonas de quebradas con materiales de relleno, ver Figura 43.

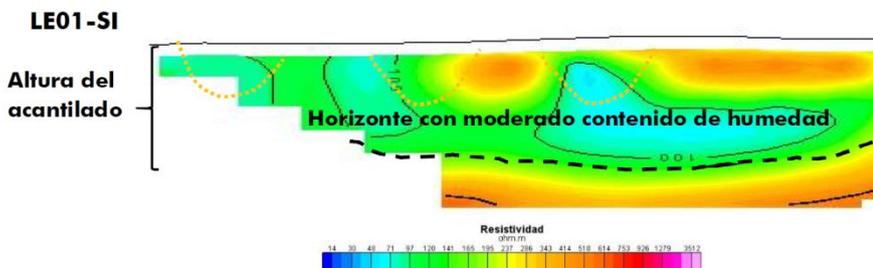
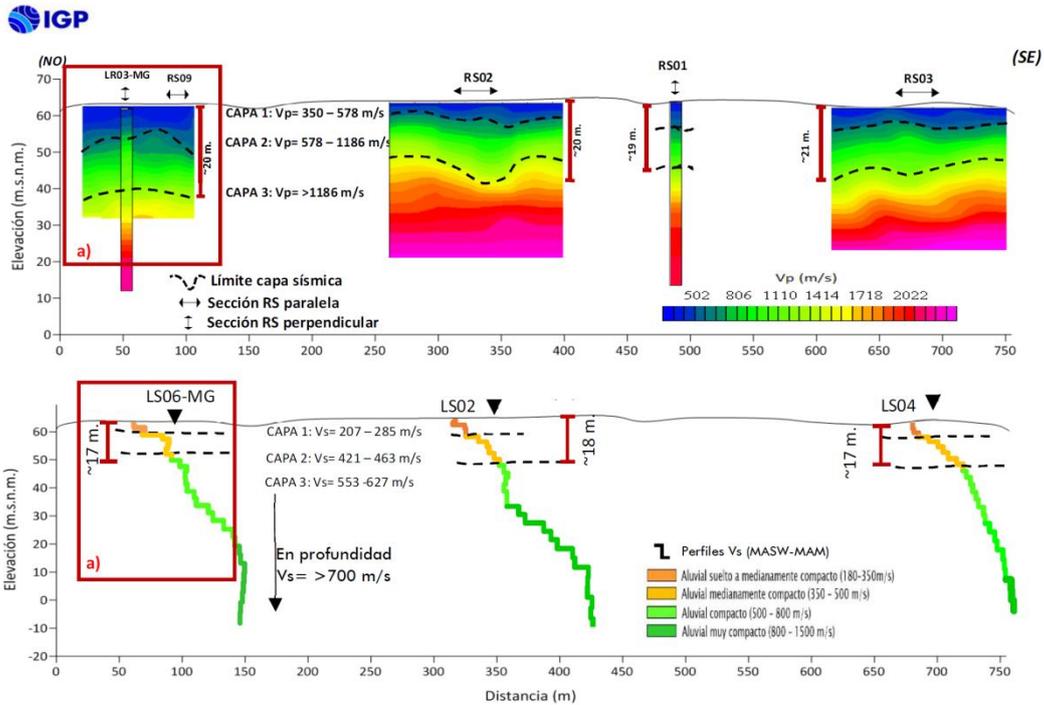
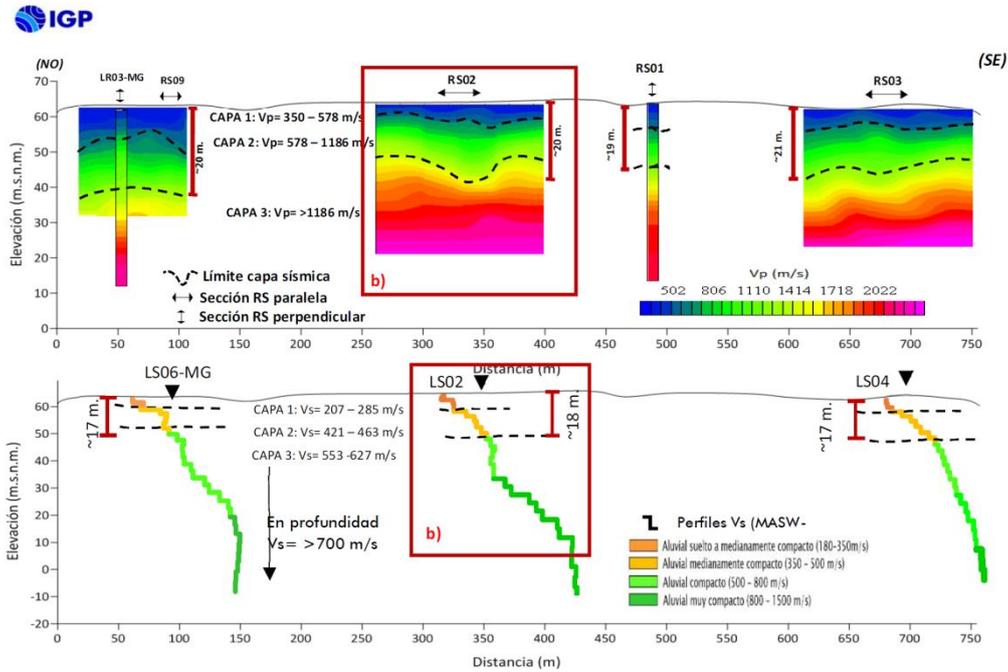


Figura 43. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos sísmico y eléctrico, con la cara expuesta del ACV, a la altura del parque de la Benemérita Guardia Civil con el Malecón Godofredo García.

- A la altura del parque Mahatma Gandhi con el Malecón Godofredo García (parte central), se observa la presencia de una capa superficial de material heterogéneo (rellenos) emplazada sobre una capa de gravas compactas, siendo coherente con las dos primeras capas identificadas con los métodos sísmicos ( $V_s < 500$  m/s) presentes hasta profundidades de 18 a 20 metros. Este material heterogéneo presenta de moderado a alto contenido de humedad a partir de los 18 metros de profundidad. A nivel superficial, los sectores con mayor contenido de humedad se correlacionan con las zonas en donde se encuentran las quebradas con rellenos, tal como se observa en la Figura 43.
- A la altura del parque Bicentenario (al borde del acantilado), se identifica la presencia de una capa superficial de material heterogéneo emplazada sobre capas de gravas compactas. Según los resultados obtenidos con los métodos sísmicos ( $V_s < 500$  m/s), se tiene el predominio de material medianamente compacto en las dos primeras capas con espesores promedios de 17 a 21 metros. Este material presenta moderado contenido de humedad a partir de los 20 metros de profundidad para luego incrementarse a mayor profundidad. A nivel superficial los sectores con suelos que presentan mayor humedad, coinciden con las zonas con presencia de quebradas rellenadas.

Estas interpretaciones son coherentes con los resultados obtenidos a partir de las razones espectrales: picos con frecuencias  $F > 10$  Hz para el primer estrato de poco espesor; frecuencias  $F = 3.0$  Hz para el segundo estrato de mediano espesor y frecuencias  $F < 2.0$  Hz para el estrato de mayor espesor.



LE01-SI

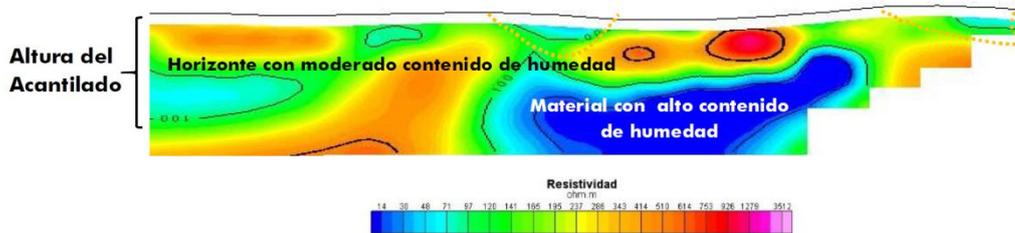


Figura 43. ...Continuación.../. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos sísmico y eléctrico, con la cara expuesta del ACV, a la altura del parque Mahatma Gandhi con el Malecón Godofredo García.

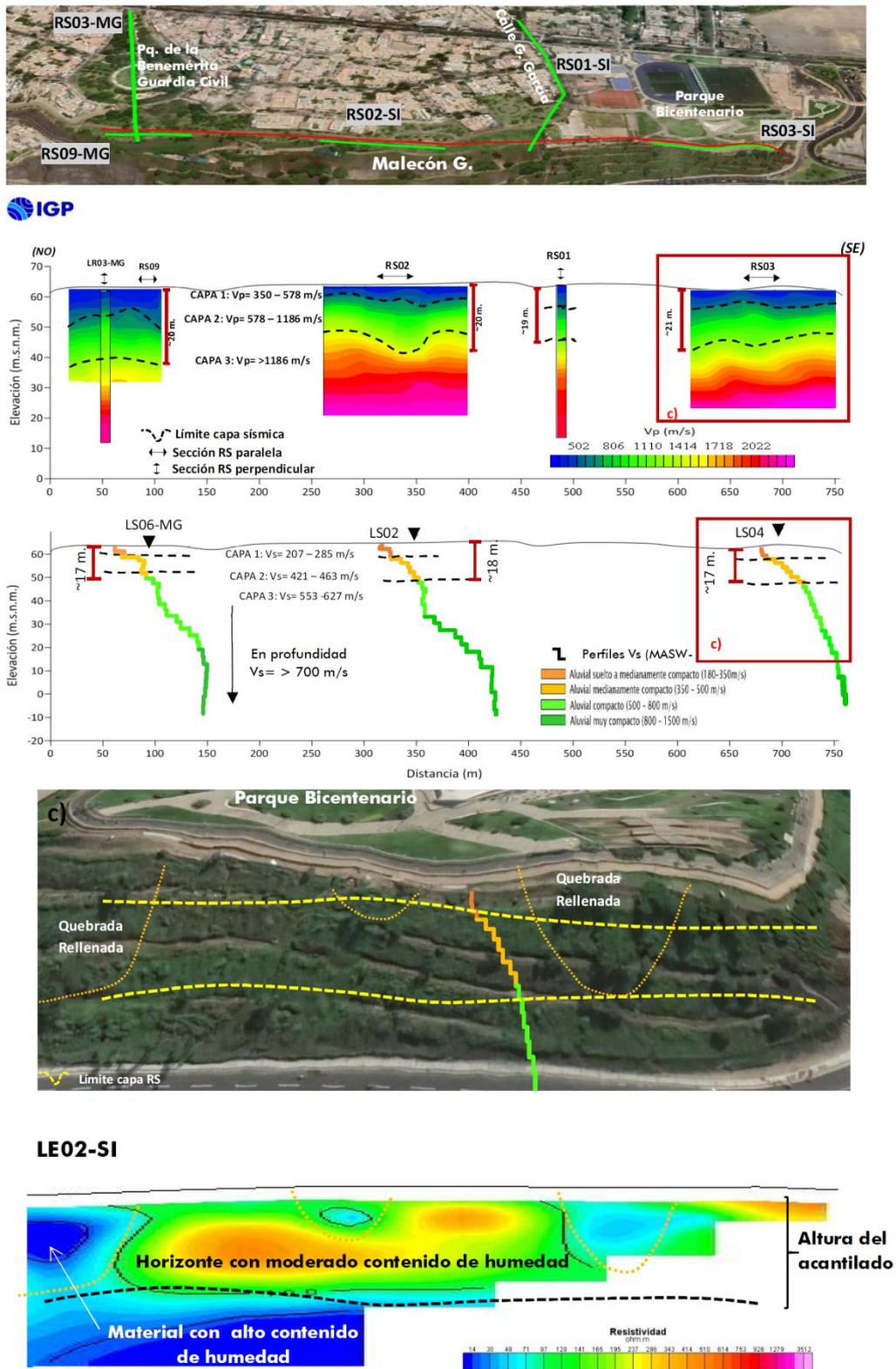


Figura 43. ...Continuación.../. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos sísmico y eléctrico, con la cara expuesta del ACV, a la altura del parque Bicentenario.

En conclusión, en el distrito de San Isidro, a nivel superficial los suelos presentan baja compacidad y densidad por estar constituidos por materiales heterogéneos y de rellenos poco compactos; mientras que, a mayor profundidad las capas del subsuelo son más compactas y de mayor densidad por estar constituidos por gravas y conglomerados consolidados. Asimismo, en el parque de la Benemérita Guardia Civil y el Malecón Godofredo García, se han identificado a nivel superficial, la presencia de estratos resistivos con bajo contenido de humedad debido a la presencia de material aluvial permeable. Por debajo de este estrato se identifica la presencia de un horizonte con alto contenido de humedad. Asimismo, en la zona del parque de la B. Guardia Civil y en la calle Godofredo Garcia se ha identificado la existencia de grietas con profundidades de hasta 2 metros; mientras que, en el parque Bicentenario las grietas alcanzan profundidades de 1 metro.

### **3.2. Delimitación de zonas de mayor riesgo por sismos**

La aplicación de métodos geofísicos para evaluar el comportamiento dinámico de los suelos en los ACV de San Isidro, ha permitido identificar espacialmente, la ubicación aproximada de la línea paralela al acantilado que delimita los suelos estables de los inestables y que ante la ocurrencia de un sismo de elevada magnitud podrían experimentar asentamientos diferenciales y/o deslizamientos en dirección de la Vía Circuito de Playas. Para el distrito de San Isidro, el análisis de los resultados se realiza de manera sectorizada y de acuerdo a la Figura 44:

**Sector A - SI:** *considera el área del acantilado, entre el parque de la Benemérita Guardia Civil (extremo norte) y la Calle 2. En este sector el límite que separa, en superficie, los suelos con diferente comportamiento dinámico, se encuentra en promedio a 50 metros del acantilado. Bordeando esta área, sobresale una franja angosta, donde*

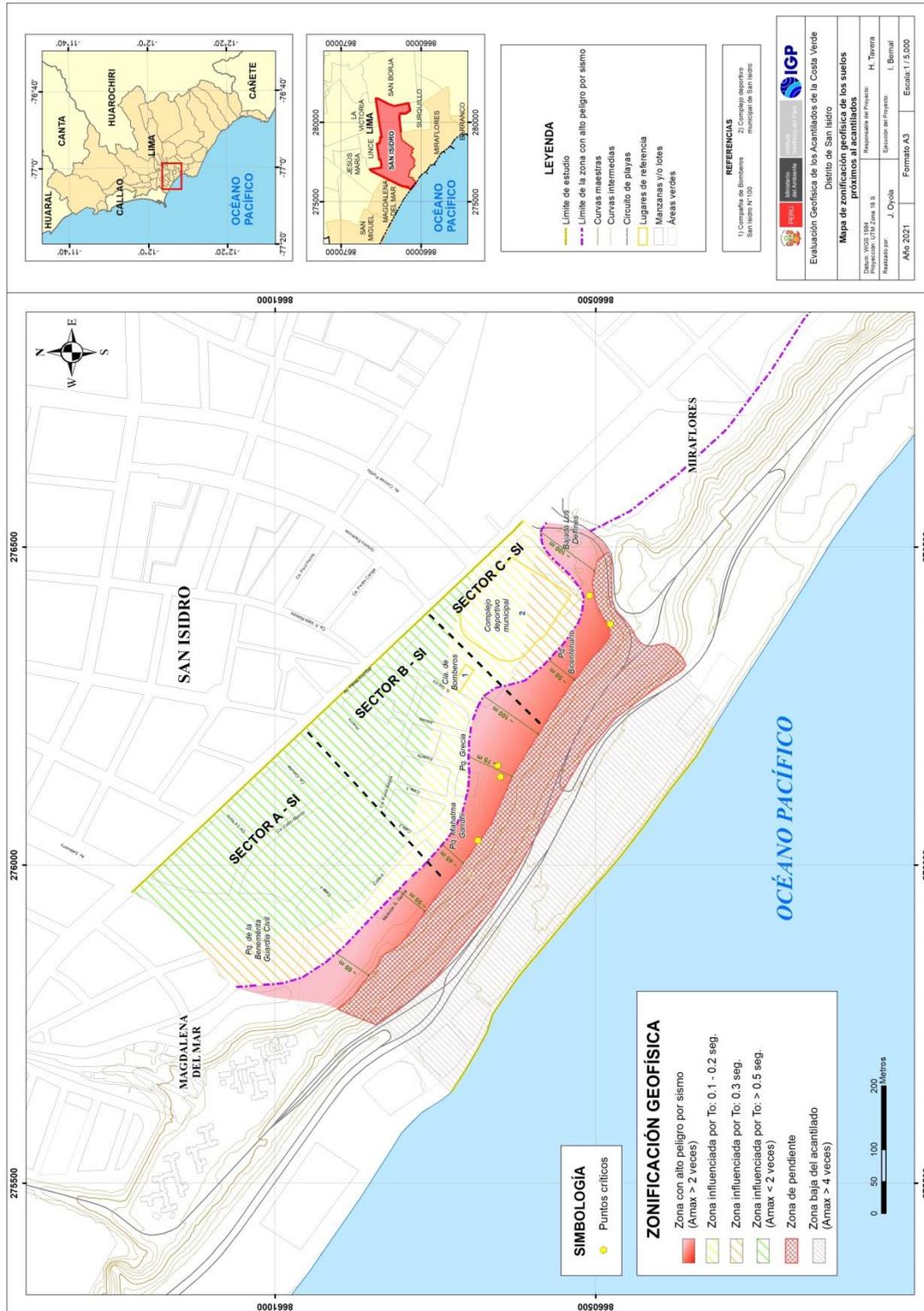


Figura 44. Delimitación de la zona con alto peligro por sismo en la parte alta del Acantilado de la Costa Verde, distrito de San Isidro. Los Sectores A-SI, B-SI y C-SI, comprenden áreas cuyos suelos presenta similares características físicas y dinámicas.

*los suelos responden a periodos de 0.3 y 0.2 segundos con amplificaciones de hasta 2 veces, que se extiende hasta la Calle A y extremo Oeste del parque de la Benemérita correspondiendo a suelos superficiales de moderada consistencia. Asimismo, a mayor distancia los suelos muestran sensibilidad a periodos mayores a 0.6 segundos con bajas amplificaciones, evidenciando que son más compactos.*

*En este sector se ha identificado la presencia de suelos con moderado contenido de humedad hasta una profundidad de 20 metros, a partir de ese nivel la humedad aumenta hasta aflorar en el borde del acantilado. Asimismo, se ha identificado la presencia de asentamientos y grietas en el suelo con profundidades del orden de 2 metros.*

**Sector B - SI:** *Considera el área del acantilado, entre la Calle 2 (extremo norte) y el Complejo Deportivo Municipal. En este sector el límite que separa, en superficie, los suelos con diferente comportamiento dinámico, se encuentra a 45 metros del acantilado a la altura del parque Mahatma Gandhi para luego aumentar progresivamente hasta los 100 metros a la altura de la Compañía de Bomberos, en la calle Godofredo García. Bordeando esta área, sobresale una franja angosta donde los suelos responden a periodos de 0.1 y 0.2 segundos con amplificaciones de hasta 2 veces, la misma que se extiende hasta media cuadra de las calles Esparta, Atena y G. García correspondiendo a suelos superficiales de moderada consistencia. Asimismo, a mayor distancia los suelos muestran sensibilidad a periodos mayores a 0.6 segundos con bajas amplificaciones, evidenciando que son más compactos.*

*En este sector los suelos presentan de moderado a alto contenido de humedad conforme se tiende hacia el borde del acantilado. Del mismo modo, a la altura de los parques Gandhi y Grecia, y parte del Malecón*

*G. García, los suelos presentan asentamientos y grietas que alcanzan profundidades de hasta 1 metro, llegando a afectar a algunas viviendas ubicadas en este sector.*

**Sector C - SI:** *Considera el área del acantilado, entre el Complejo Deportivo Municipal (extremo norte) y la bajada Los Delfines (límite con el distrito de Miraflores). En este sector el límite en superficie que separa, los suelos con diferente comportamiento dinámico, se encuentra a 50 metros de distancia del acantilado y aumenta progresivamente hasta los 100 metros hacia su extremo sur en la bajada Los Delfines. Bordeando esta área y hacia Av. Pérez-Aranibar, sobresale una franja donde los suelos responden a periodos de 0.3 y 0.2 segundos con amplificaciones de hasta 2 veces que corresponderían a suelos superficiales de moderada consistencia.*

*En este sector, los suelos tienen el predominio de material aluvial con moderado a alto contenido de humedad hasta profundidades de 50 metros. Debido a la presencia de áreas verdes, los sistemas de regadío ocasionan problemas geotécnicos (grietas, asentamientos), como los observados en el extremo sur del parque del Bicentenario, donde los asentamientos y grietas en el suelo alcanzan hasta un metro de profundidad.*

## CONCLUSIONES

*El análisis y evaluación geofísica de los Acantilados de la Costa Verde en el distrito de San Isidro, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:*

- *A lo largo del acantilado, se define la presencia de tres capas sísmicas:*
  - *La primera capa presenta velocidades de ondas de compresión  $V_p = 350$  a  $578$  m/s y de corte  $V_s = 207$  a  $285$  m/s, correspondiendo a material aluvial suelto a medianamente compacto. El espesor de esta capa es del orden de 4 a 7 metros.*
  - *La segunda presenta velocidades  $V_p = 578$  a  $1186$  m/s y  $V_s = 421$  a  $463$  m/s, correspondiendo a material aluvial medianamente compacto. Esta capa presenta espesores de 10 a 15 metros, estando los espesores mayores por el Malecón Godofredo García.*
  - *La tercera capa presenta velocidades  $V_p > 1186$  m/s y  $V_s = 553$  a  $627$  m/s, correspondiente a material aluvial consolidado. Esta capa presenta espesores que superan los 12 metros.*
  - *A mayor profundidad, las velocidades de las ondas de corte  $V_s$  superan los 700 m/s correspondiente a grava compacta.*
  
- *En el extremo norte del acantilado, los suelos poco a moderadamente consolidados son parte de una capa de 20 a 8 metros de espesor, la misma que presenta mayor espesor en el borde del acantilado y menor a distancias de 100 metros hacia el área urbana. En la parte central y extremo sur, el espesor de la capa disminuye de 21 a 11 metros. Este escenario, permite que los suelos en el extremo sur evidencien menor consistencia respecto a su extremo norte.*

- *En el límite del acantilado, a la altura del parque de la Benemérita Guardia Civil (extremo norte) se ha identificado la presencia de dos horizontes geoelectrónicos, cuyo material a nivel superficial presenta bajo contenido de humedad; mientras que, a profundidades de 20 metros presentan de moderado a alto contenido de humedad, para luego aflorar en el borde del acantilado incrementando la inestabilidad de los suelos en este sector. Entre la Calle 2 y el complejo deportivo de San Isidro (zona central), se tiene el predominio de material con moderado contenido de humedad; mientras que, en el parque Mahatman y Grecia se tiene material con alto contenido de humedad a una profundidad de 20 metros, lo cual contribuye con la generación de grietas y asentamientos de suelos identificados en superficie. Hacia la parte externa del parque Bicentenario (extremo sur), se ha identificado la existencia de un horizonte geoelectrónico con moderado contenido de humedad.*
- *De acuerdo a los resultados obtenidos con la técnica del georadar, los asentamientos y grietas en el suelo llegan hasta los 2 metros de profundidad en el Malecón Godofredo García y Av. Pérez Aranibar. Asimismo, en el parque Bicentenario y exteriores, las grietas asociadas a hundimiento del terreno llegan hasta profundidades de 1 a 2 metros.*
- *Los resultados obtenidos con razones espectrales evidencian que los suelos próximos al acantilado están compuestos por materiales heterogéneos, complejos e inestables. A mayor distancia, en dirección del área urbana, los suelos son más homogéneos y/o compactos en una capa de gran espesor.*
- *A lo largo del Acantilado de la Costa Verde en el distrito de San Isidro, el límite que separa los suelos estables de los inestables y cuyo comportamiento dinámico representa un alto peligro ante sismos de gran*

*magnitud, se encuentra demarcado por el Malecón Godofredo García hasta la bajada Los Delfines. Este límite se encuentra a distancias que varían entre 50 a 100 metros desde el acantilado hacia el área urbana.*

- *Finalmente, las zonas con mayor probabilidad de experimentar un comportamiento dinámico anómalo ante la posible ocurrencia de sismos de gran magnitud son: El sector del Malecón Godofredo García frente a los parques de la Benemérita Guardia Civil, Mahatma Gandhi y Grecia; entre la calle Godofredo García y el talud de la bajada Los Delfines, y hacia el extremo Oeste del Complejo deportivo municipal.*

## **BIBLIOGRAFÍA**

- ASTM D6432-11, Standard Guide for using the Surface ground Penetrating Radar Method for Subsurface, Investigation. <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/astm>.
- CISMID (2005). Estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico en Lima y Callao. Distrito de San Isidro. APESEG.
- GSSI, Antenas Manual MN30-903 Rev. Geophysical Survey Systems. Inc. 87 pp.
- INDECI-PNUD (2014). Estudio PCS "Mapas de peligros, vulnerabilidad y riesgos, plan de usos del suelo ante desastres, proyectos y medidas de mitigación de la Costa Verde". Proyecto de la Municipalidad de Lima – PNUD y Ciudades sostenibles INDECI-PNUD
- INGEMMET (1997). Estudio de la seguridad física de los Acanuilados de la Costa Verde.
- INGEMMET (2015). Peligros Geológicos en el área de Lima Metropolitana y la región Callao.
- Loke M.H. (1996-2004). Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys
- Marrios A. Sánchez-Sesma F. (2015). Full microtremor H/V (Z:f) inversion for shallow subsurface characterization. Geophysical Journal International.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface, Quaterly Report of Railway Technical Research Institute, 30(1):25-33.
- Orellana, E (1982). "Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua". 2ª ed. Madrid: Paraninfo Volumen 1.
- Quintana A. (2013). Aplicación de la Tomografía Eléctrica en la Caracterización del Deslizamiento de Doña Mencía. Tesis de grado para optar el título de maestría en Geofísica y Meteorología. Universidad de Granada, España.

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

Richards B.G. (1985). "Geotechnical aspects of Residual Soils". Southeast Asian Geotechnical. Society, Scorpion Press, Hong Kong.

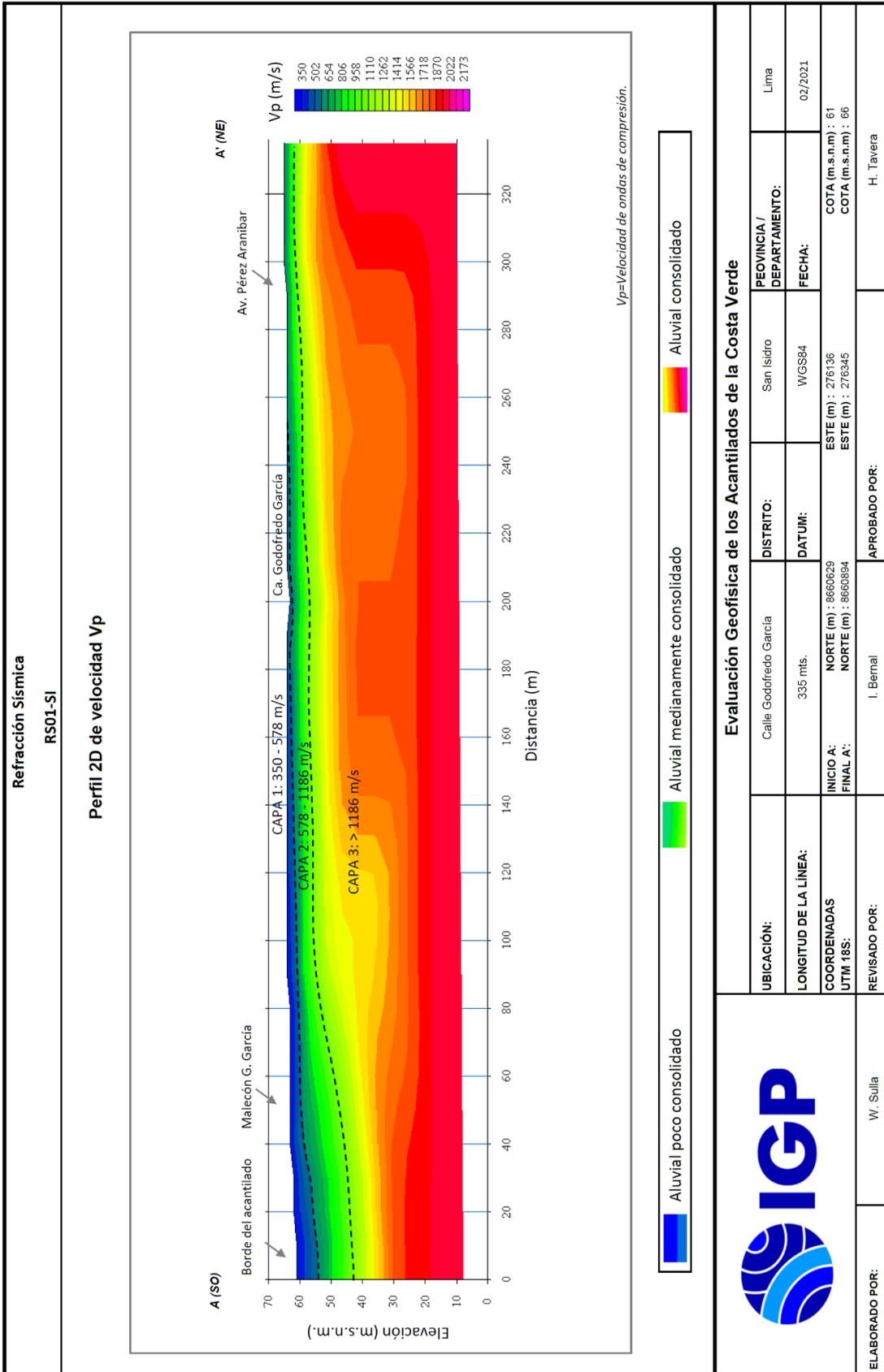
Sandoval V. (2013). Estudio de la robustez de la estimación espectral de la técnica h/v de Nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos.

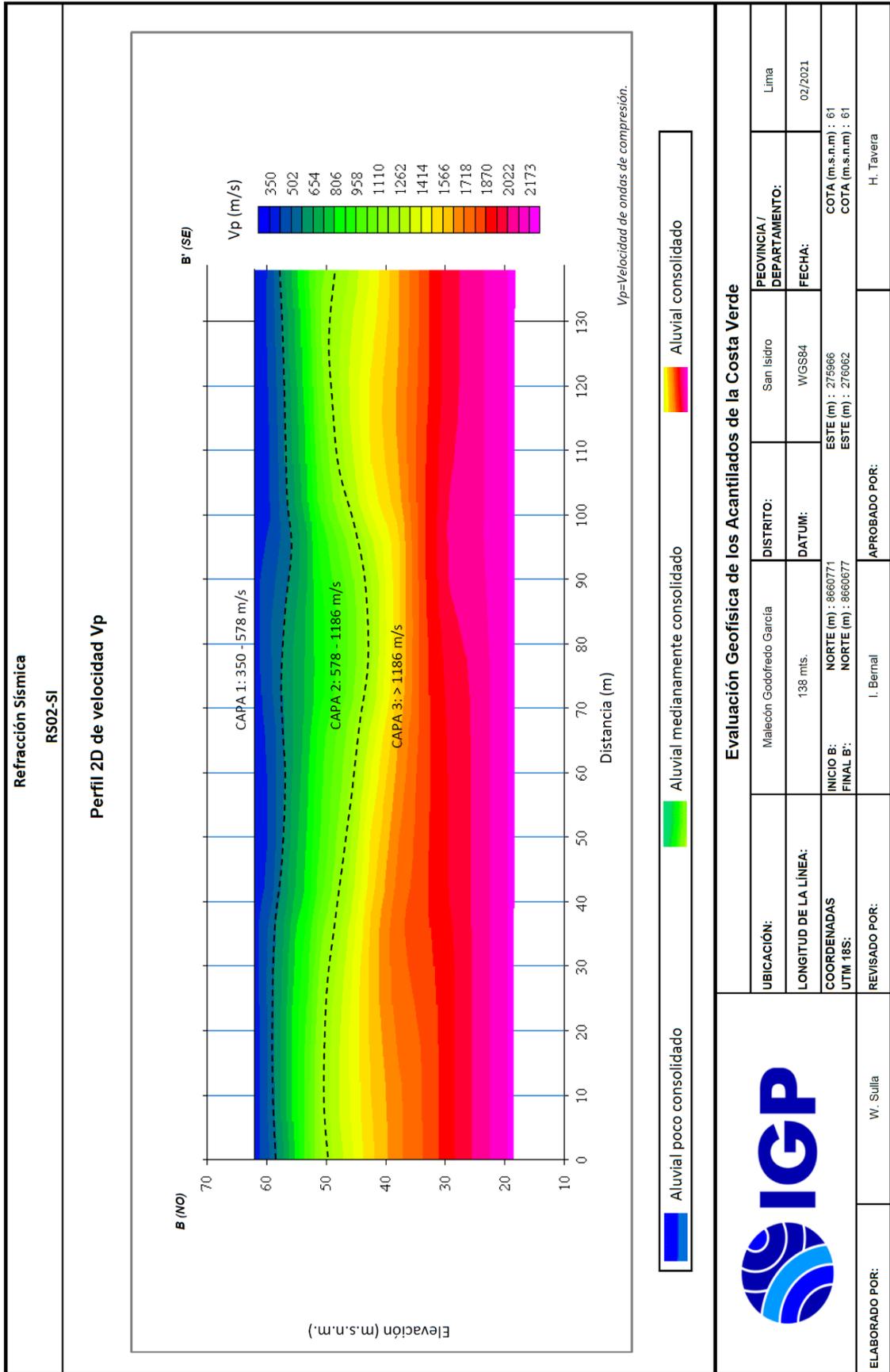
SESAME. Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations, Research Report WP12, Available online at: <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm>.2004.

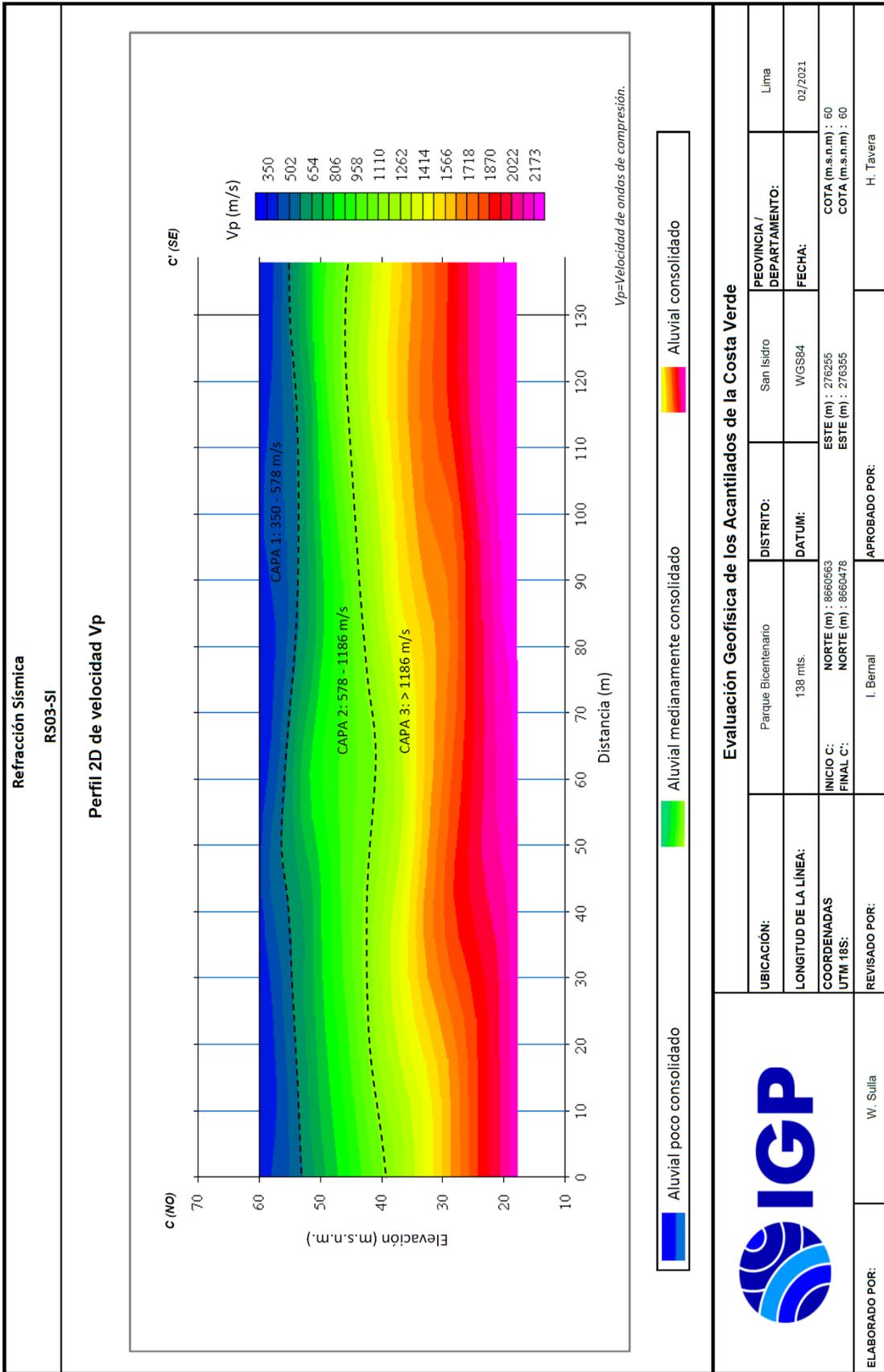
Telford W.M, Geldart L.P. and Sheriff R.E. (1990). Applied Geophysics. 2ª ed. New York: Cambridge University Press

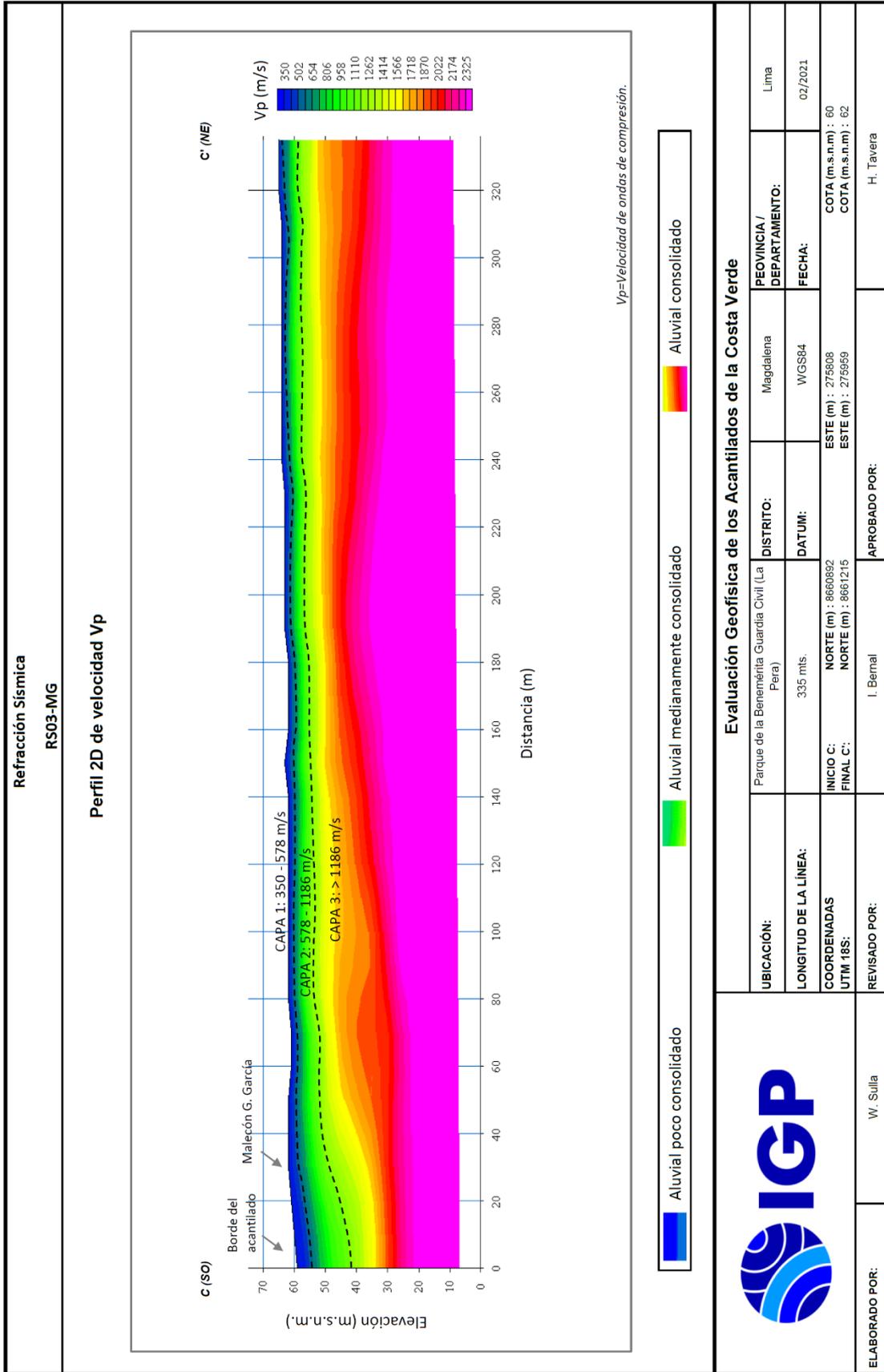
Villela, A. (2013). Análisis y aplicación de las propiedades de polarización de la señal del Georadar. Tesis de doctorado del centro de Investigación Científica y de educación Superior de ensenada (CICESE).

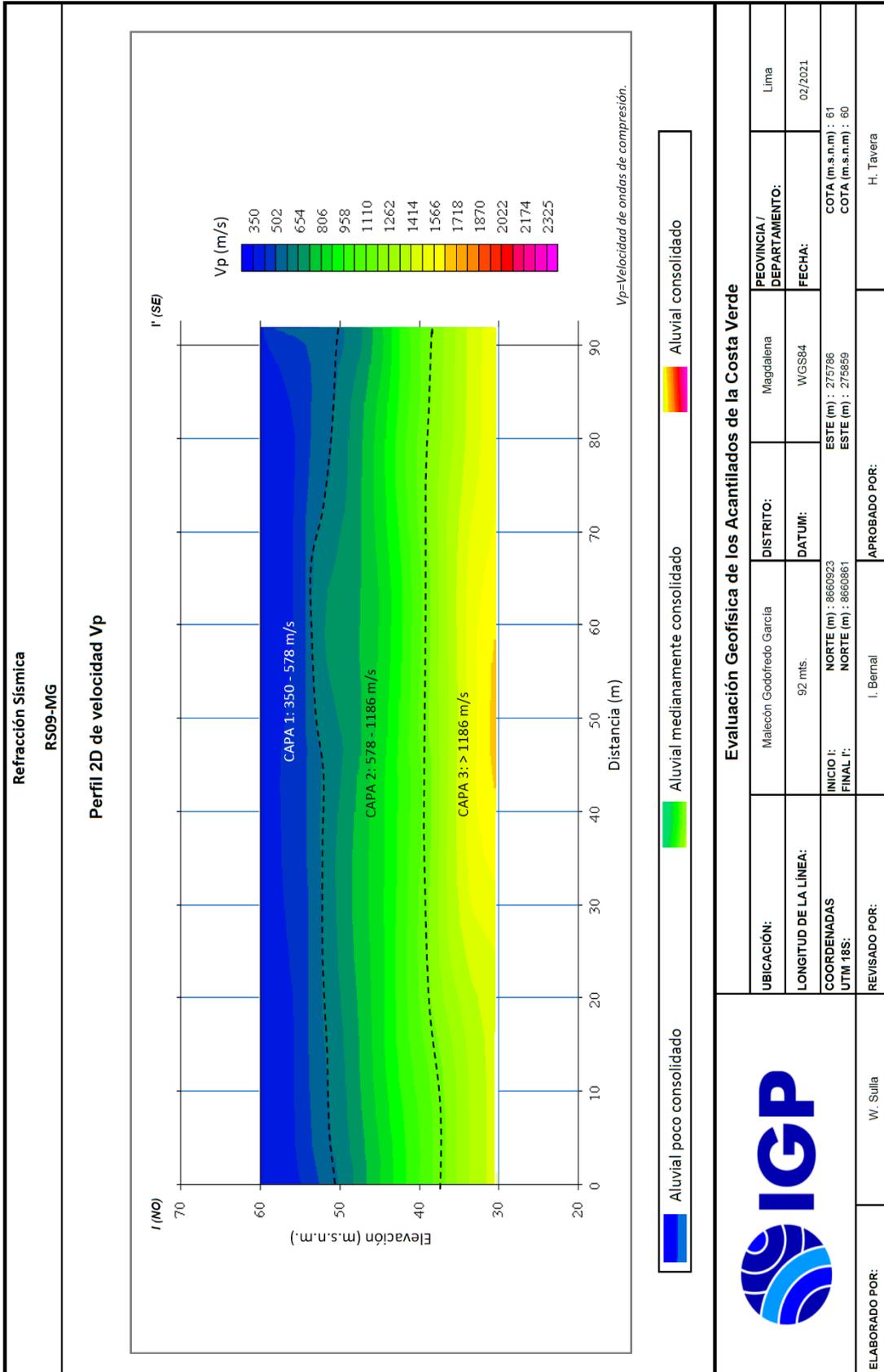
## **ANEXO I. Secciones de Refracción Sísmica**



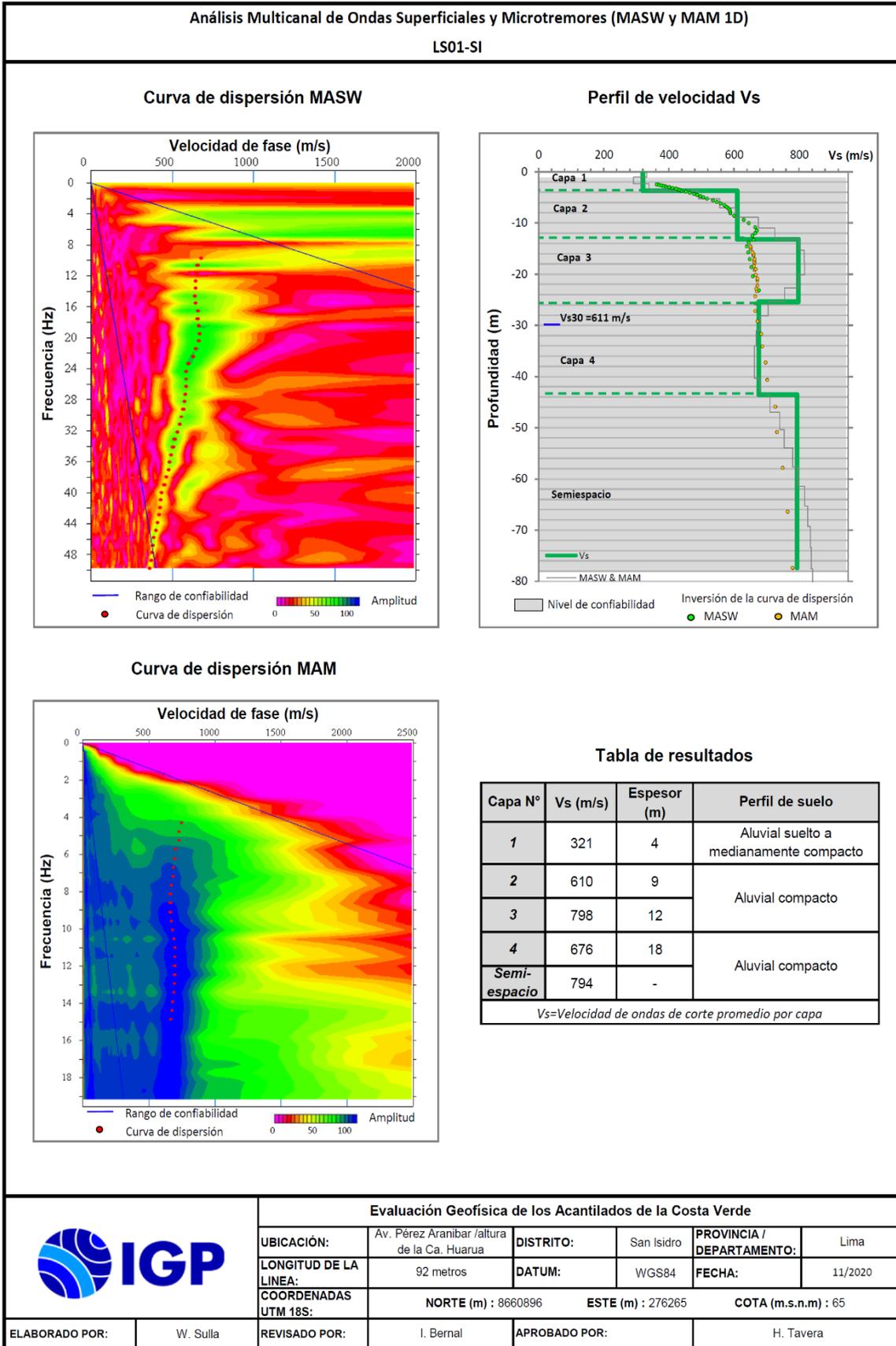








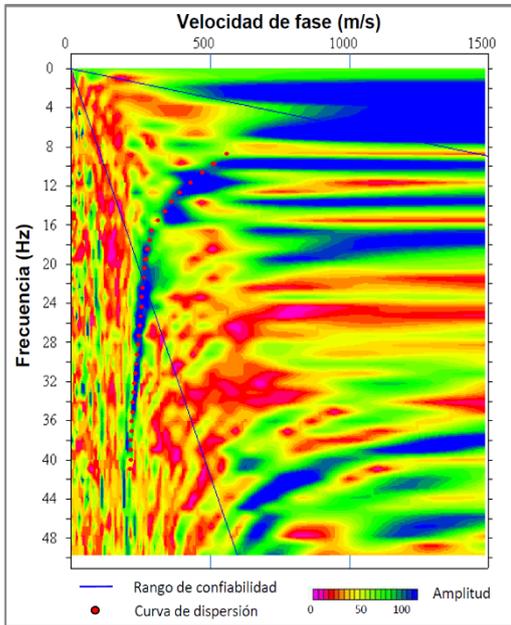
**ANEXO II. Perfiles MASW y MAM.**



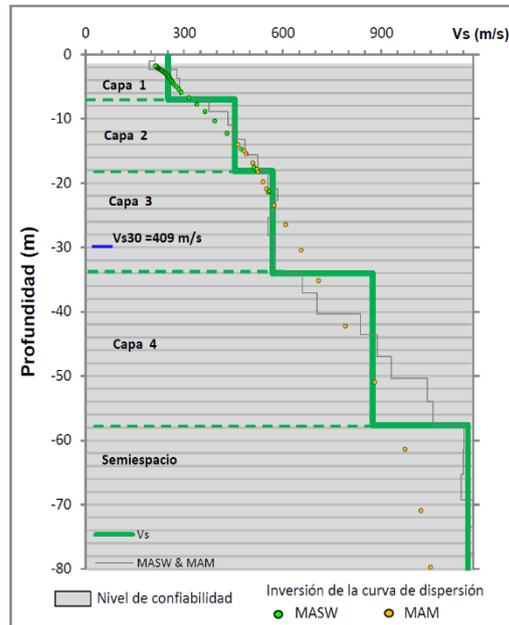
Análisis Multicanal de Ondas Superficiales y Microtremores (MASW y MAM 1D)

LS02-SI

Curva de dispersión MASW



Perfil de velocidad Vs



Curva de dispersión MAM

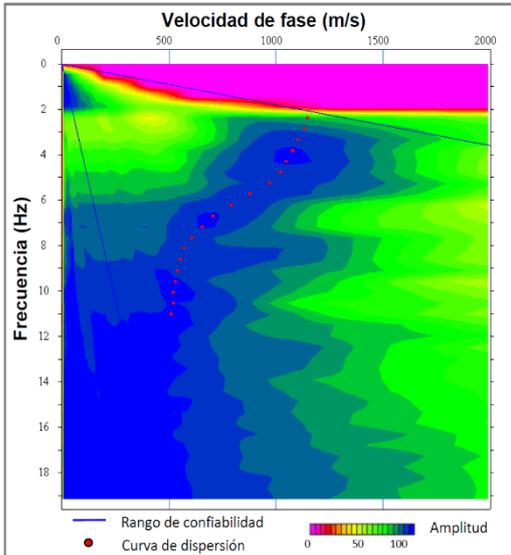
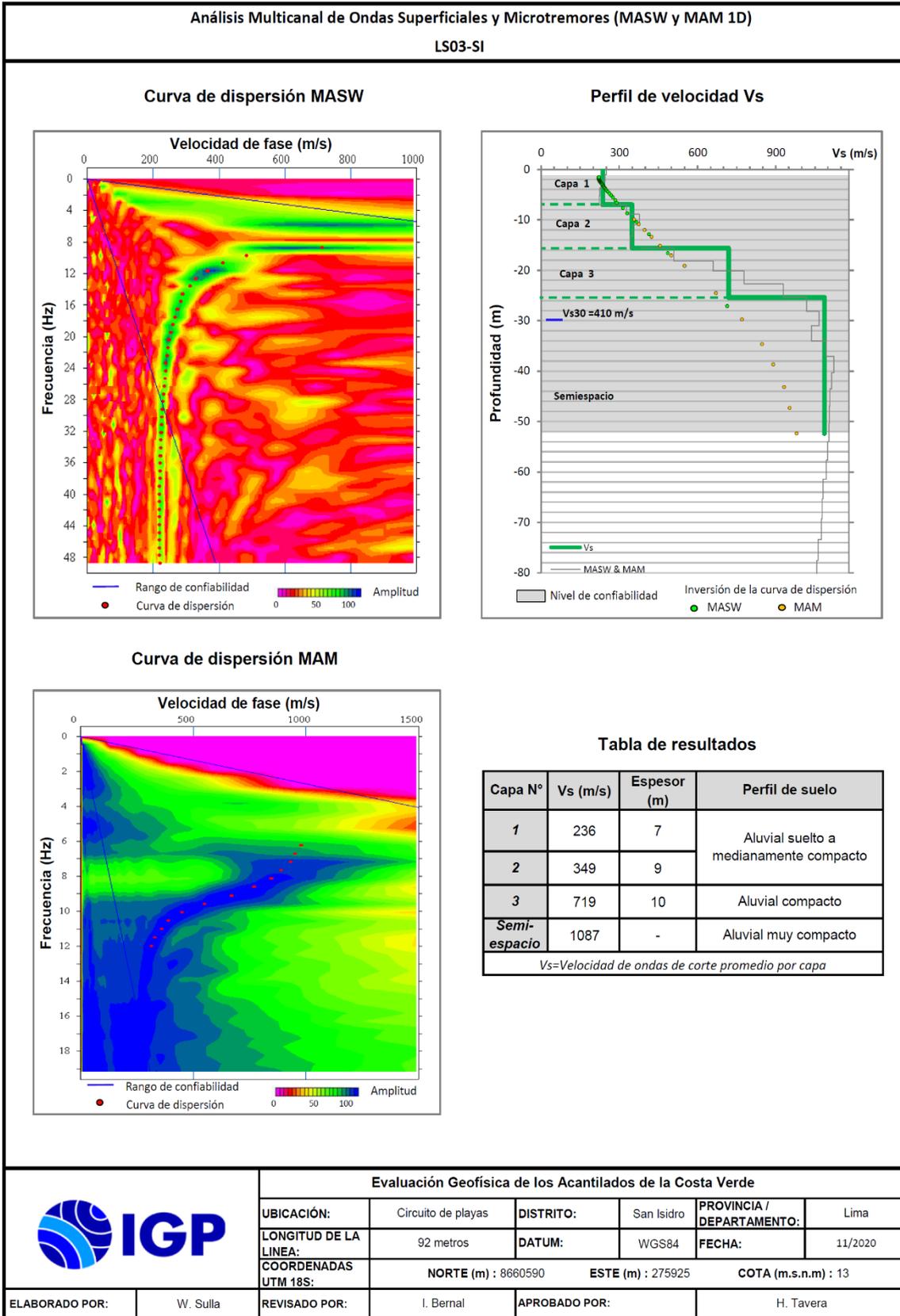


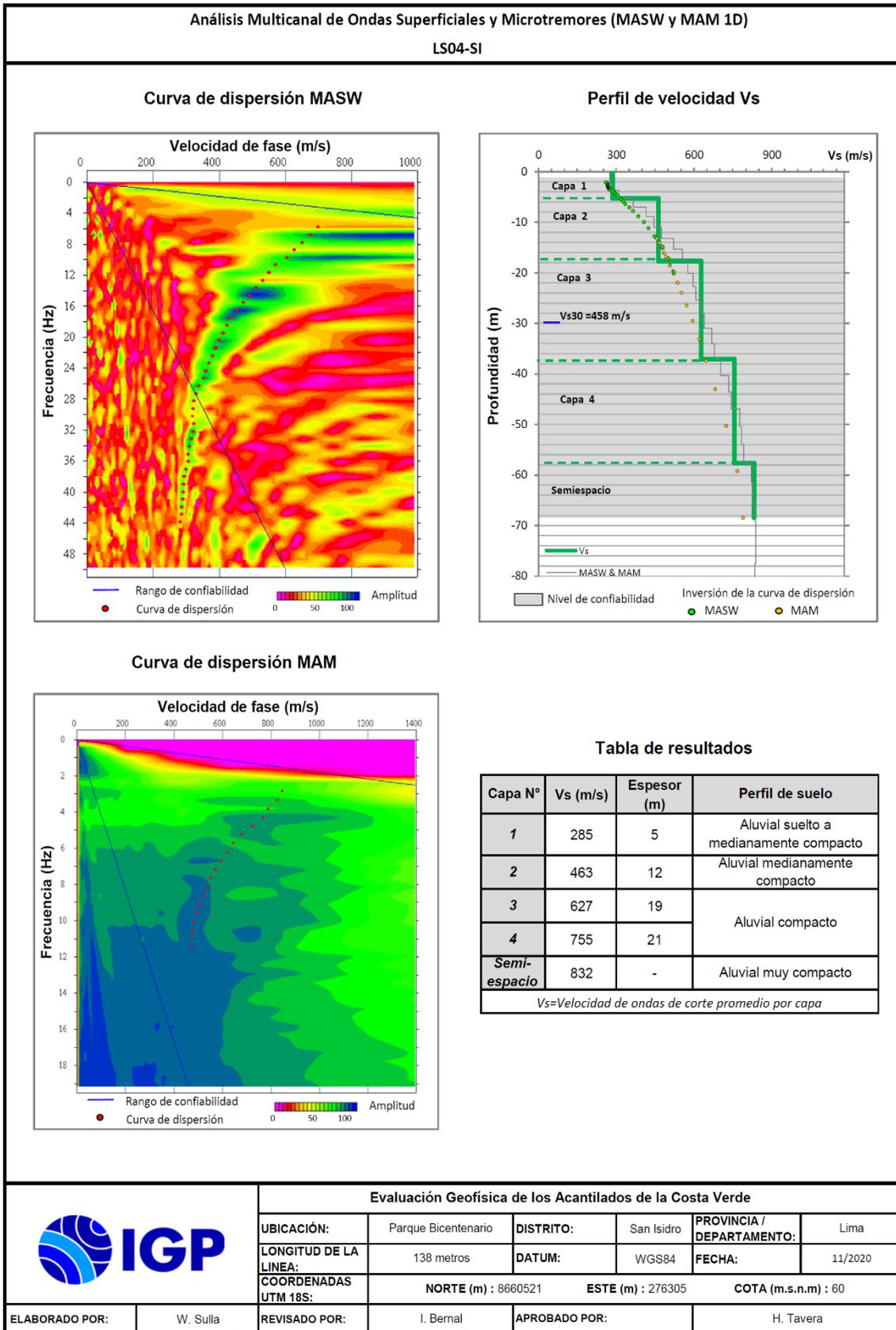
Tabla de resultados

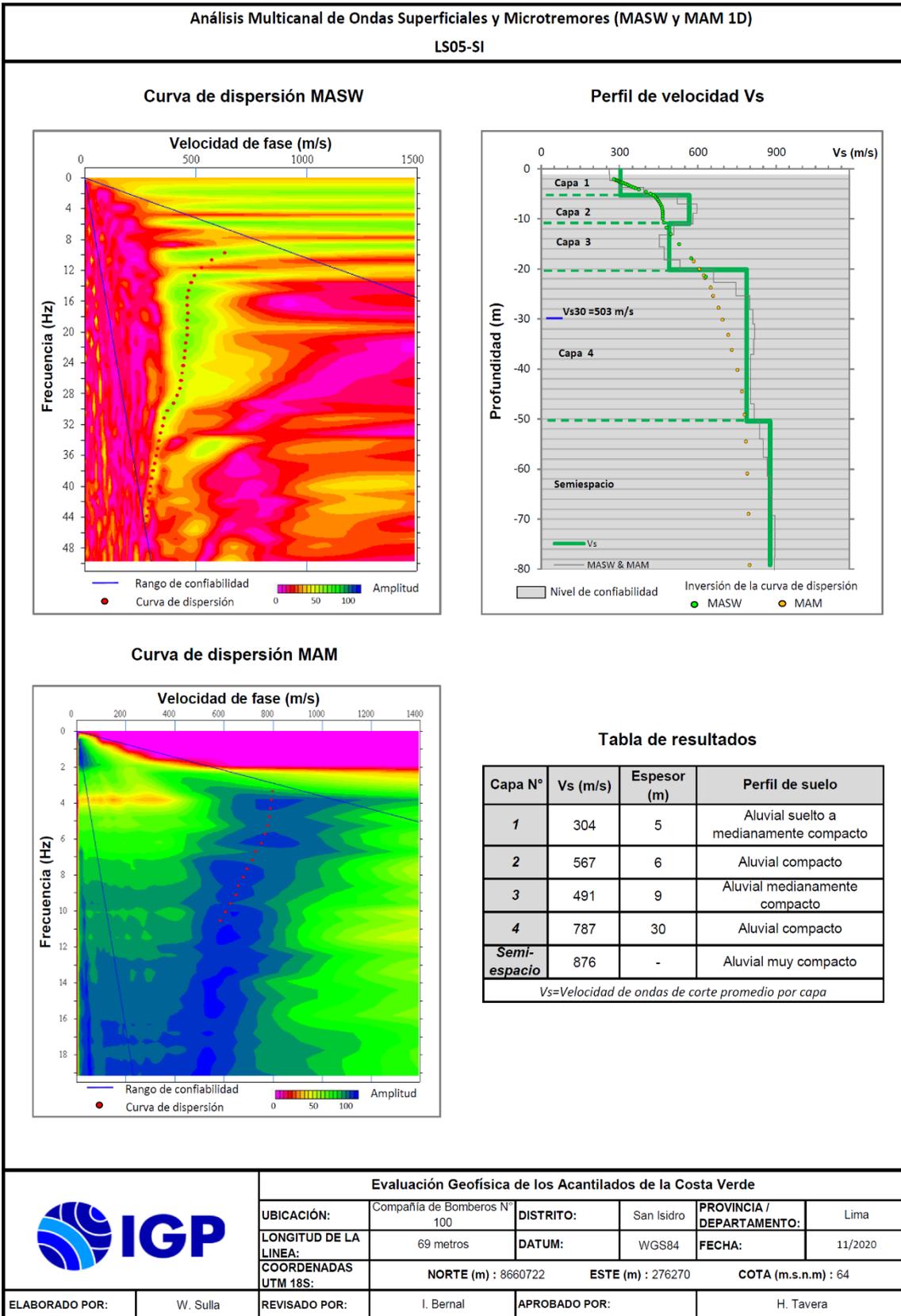
Capa N°	Vs (m/s)	Espesor (m)	Perfil de suelo
1	252	7	Aluvial suelto a medianamente compacto
2	454	11	Aluvial medianamente compacto
3	569	16	Aluvial compacto
4	874	24	Aluvial muy compacto
Semi-espacio	1164	-	

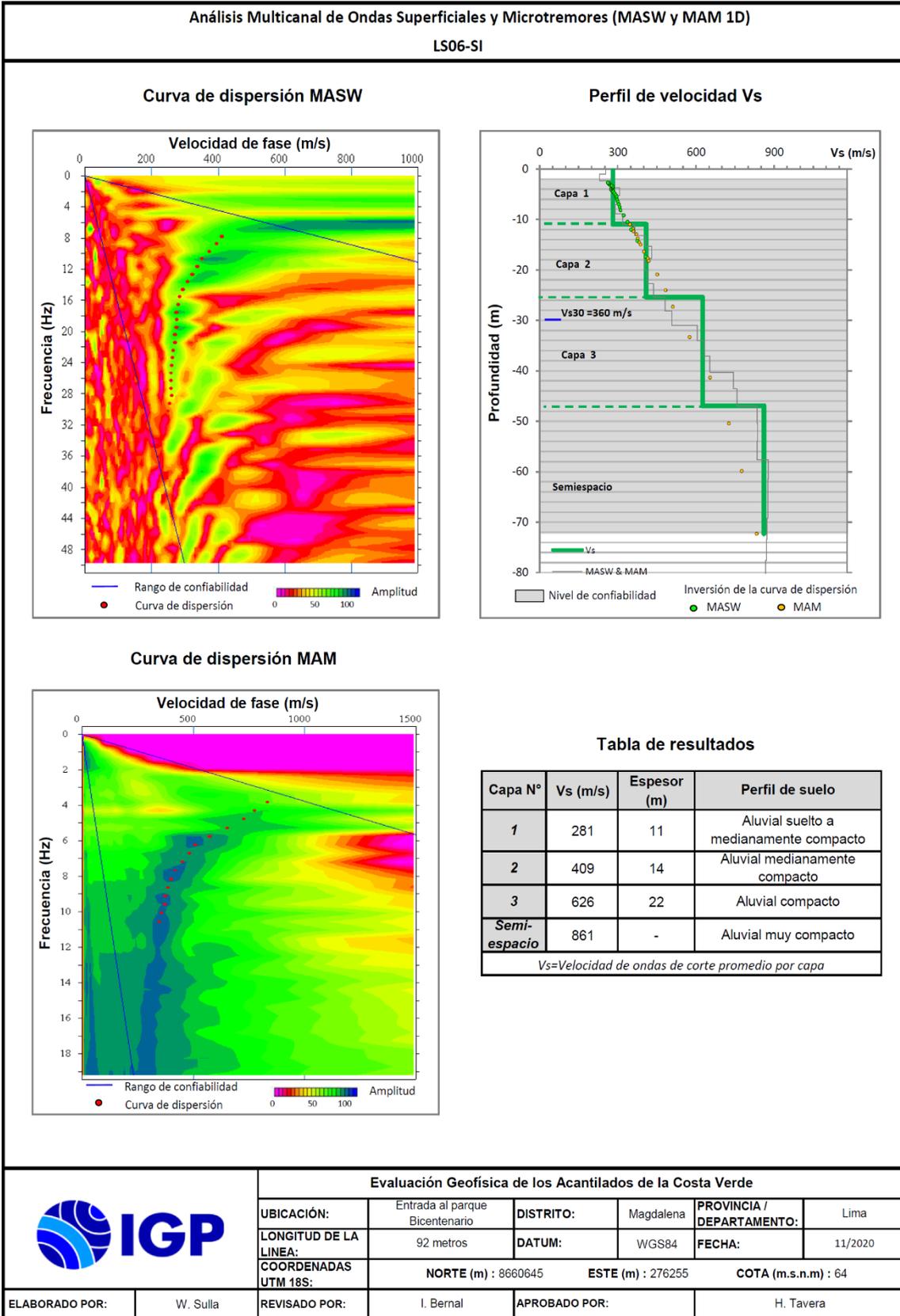
*Vs=Velocidad de ondas de corte promedio por capa*

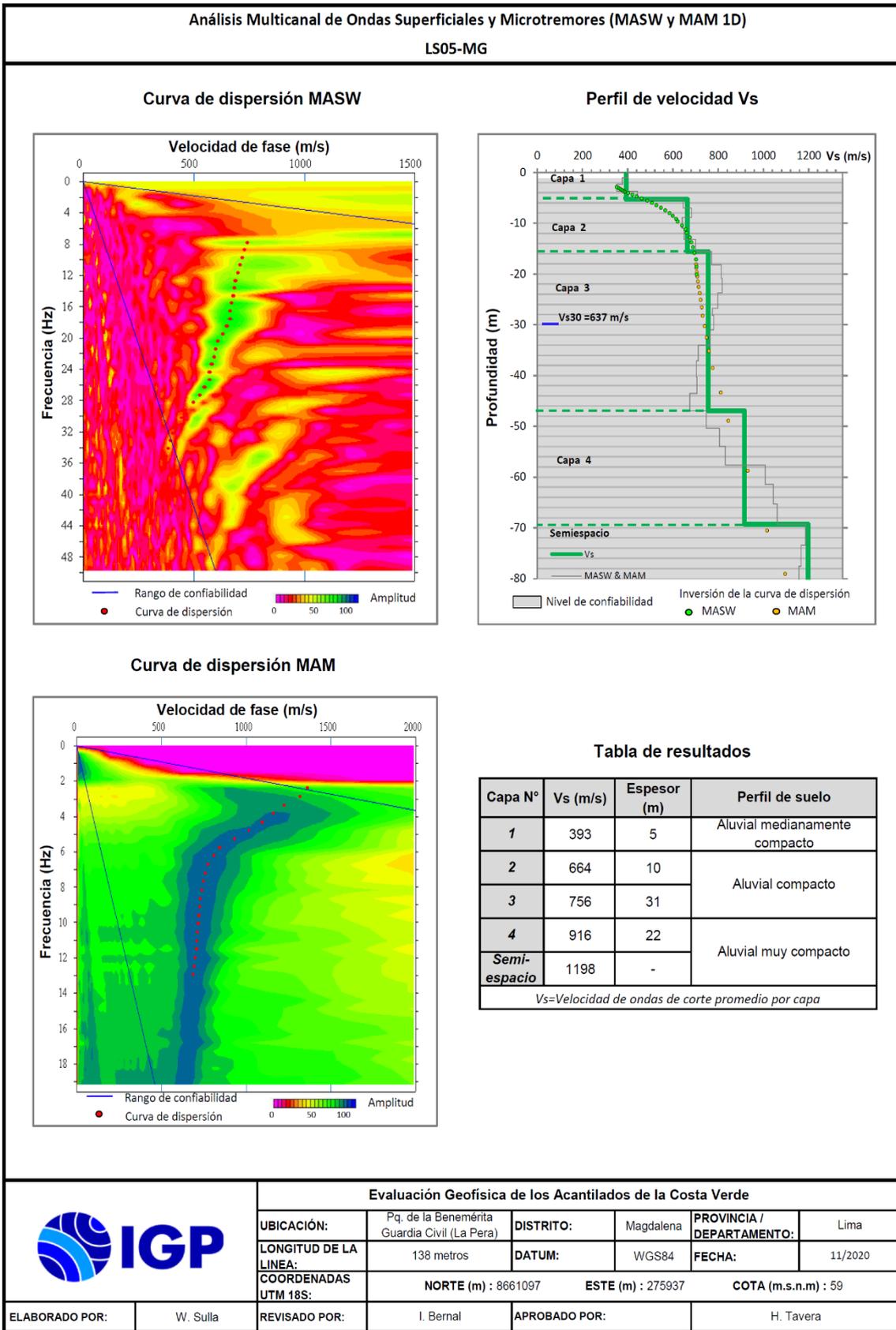
	<b>Evaluación Geofísica de los Acatilados de la Costa Verde</b>					
	<b>UBICACIÓN:</b>	Malecón Godofredo García	<b>DISTRITO:</b>	San Isidro	<b>PROVINCIA / DEPARTAMENTO:</b>	Lima
	<b>LONGITUD DE LA LINEA:</b>	138 metros	<b>DATUM:</b>	WGS84	<b>FECHA:</b>	11/2020
	<b>COORDENADAS UTM 18S:</b>	NORTE (m) : 8660726      ESTE (m) : 276012		COTA (m.s.n.m) : 62		
<b>ELABORADO POR:</b>	W. Sullá	<b>REVISADO POR:</b>	I. Bernal	<b>APROBADO POR:</b>	H. Tavera	







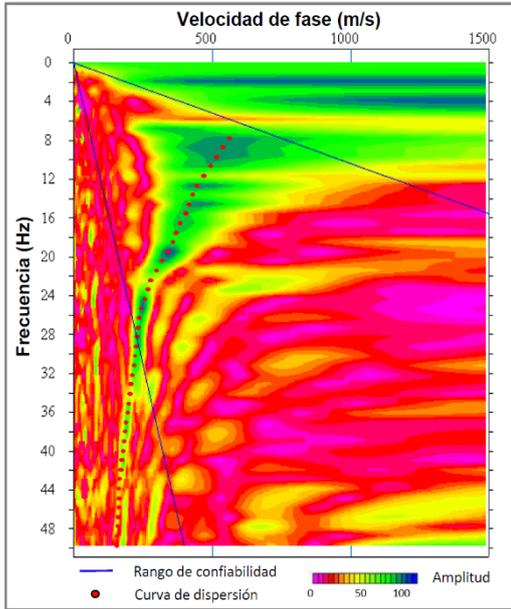




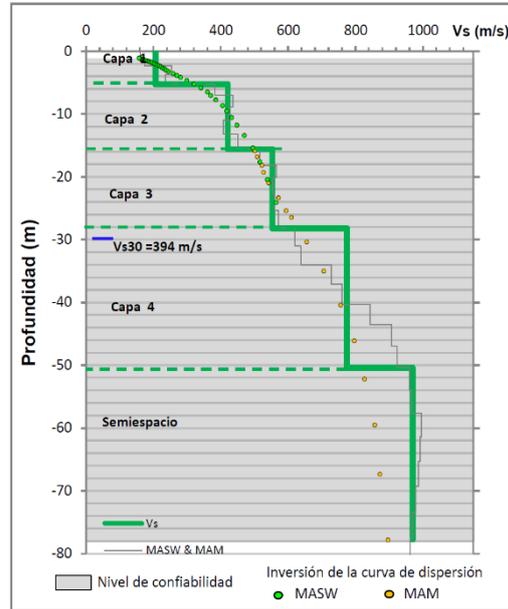
Análisis Multicanal de Ondas Superficiales y Microtremores (MASW y MAM 1D)

LS06-MG

Curva de dispersión MASW



Perfil de velocidad Vs



Curva de dispersión MAM

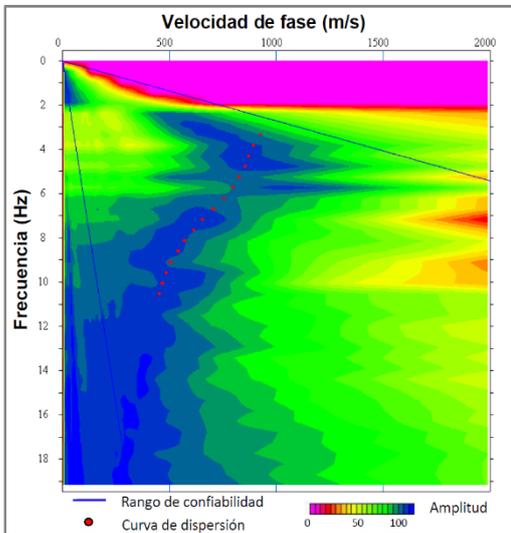


Tabla de resultados

Capa N°	Vs (m/s)	Espesor (m)	Perfil de suelo
1	207	5	Aluvial suelto a medianamente compacto
2	421	10	Aluvial medianamente compacto
3	553	13	Aluvial compacto
4	774	22	
Semi-espacio	970	-	Aluvial muy compacto

*Vs=Velocidad de ondas de corte promedio por capa*

	<b>Evaluación Geofísica de los Acatilados de la Costa Verde</b>					
	UBICACIÓN:	Malecón Godofredo García	DISTRITO:	Magdalena	PROVINCIA / DEPARTAMENTO:	Lima
	LONGITUD DE LA LINEA:	92 metros	DATUM:	WGS84	FECHA:	11/2020
	COORDENADAS UTM 18S:	NORTE (m) : 8660889	ESTE (m) : 275826	COTA (m.s.n.m) : 81		
	ELABORADO POR:	W. Sullá	REVISADO POR:	I. Bernal	APROBADO POR:	H. Tavera

### **ANEXO III. Tablas con parámetros sísmicos**

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS01-SI.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	321	737	4
2	610	1398	9
3	798	1749	12
4	676	1826	18
Semi-espacio	794	2251	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS02-SI.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	252	498	7
2	454	815	11
3	569	1571	16
4	874	2120	24
Semi-espacio	1164	2959	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS03-SI.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	236	479	7
2	349	910	9
3	719	1544	10
Semi-espacio	1087	2340	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS04-SI.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	285	484	5
2	463	727	12
3	627	1410	19
4	755	2254	21
Semi-espacio	832	2352	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS05-SI.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	304	706	5
2	567	924	6
3	491	1292	9
4	787	1745	30
Semi-espacio	876	1844	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS06-SI.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	281	455	11
2	409	859	14
3	626	1133	22
Semi-espacio	861	1612	-

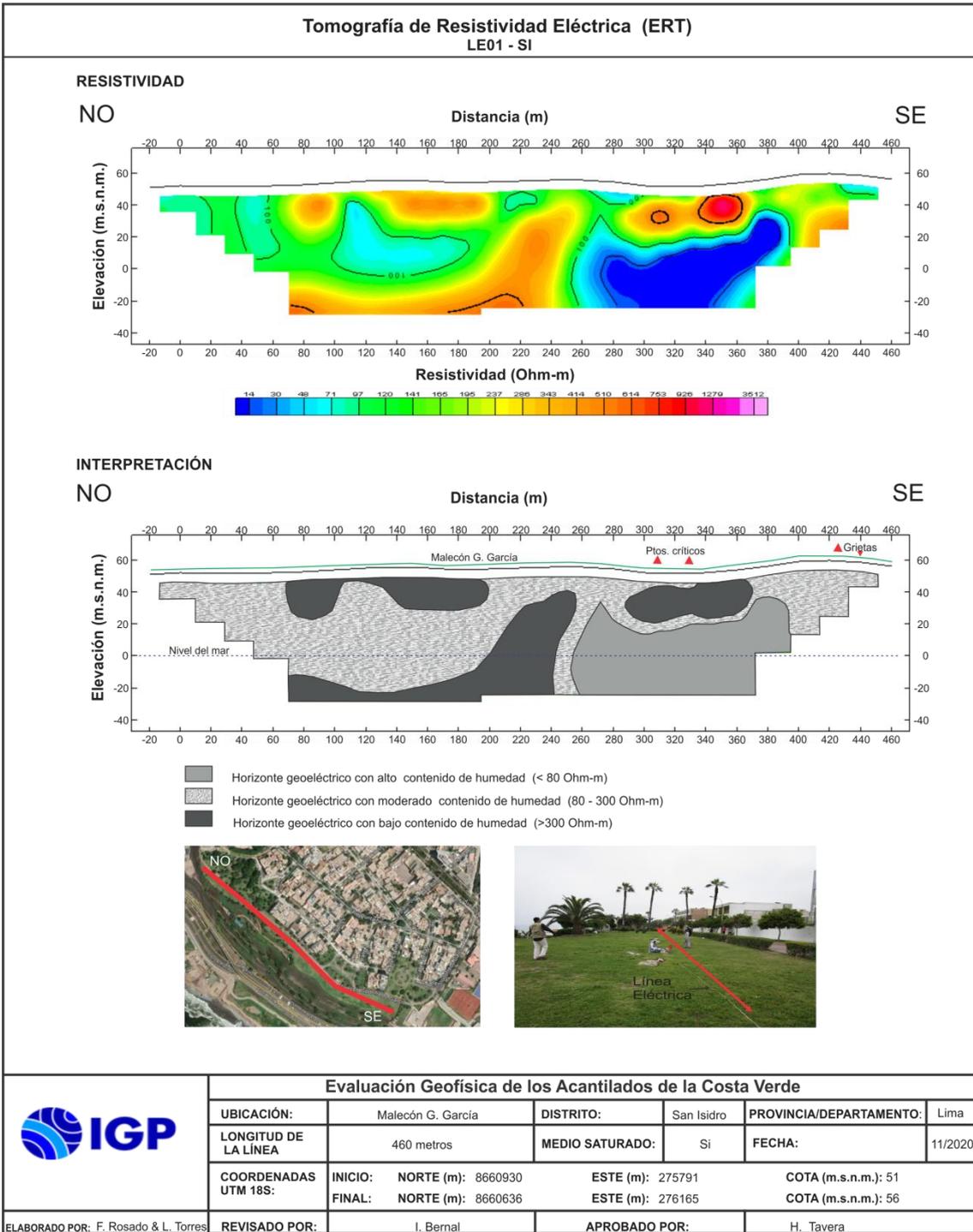
Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS05-MG.

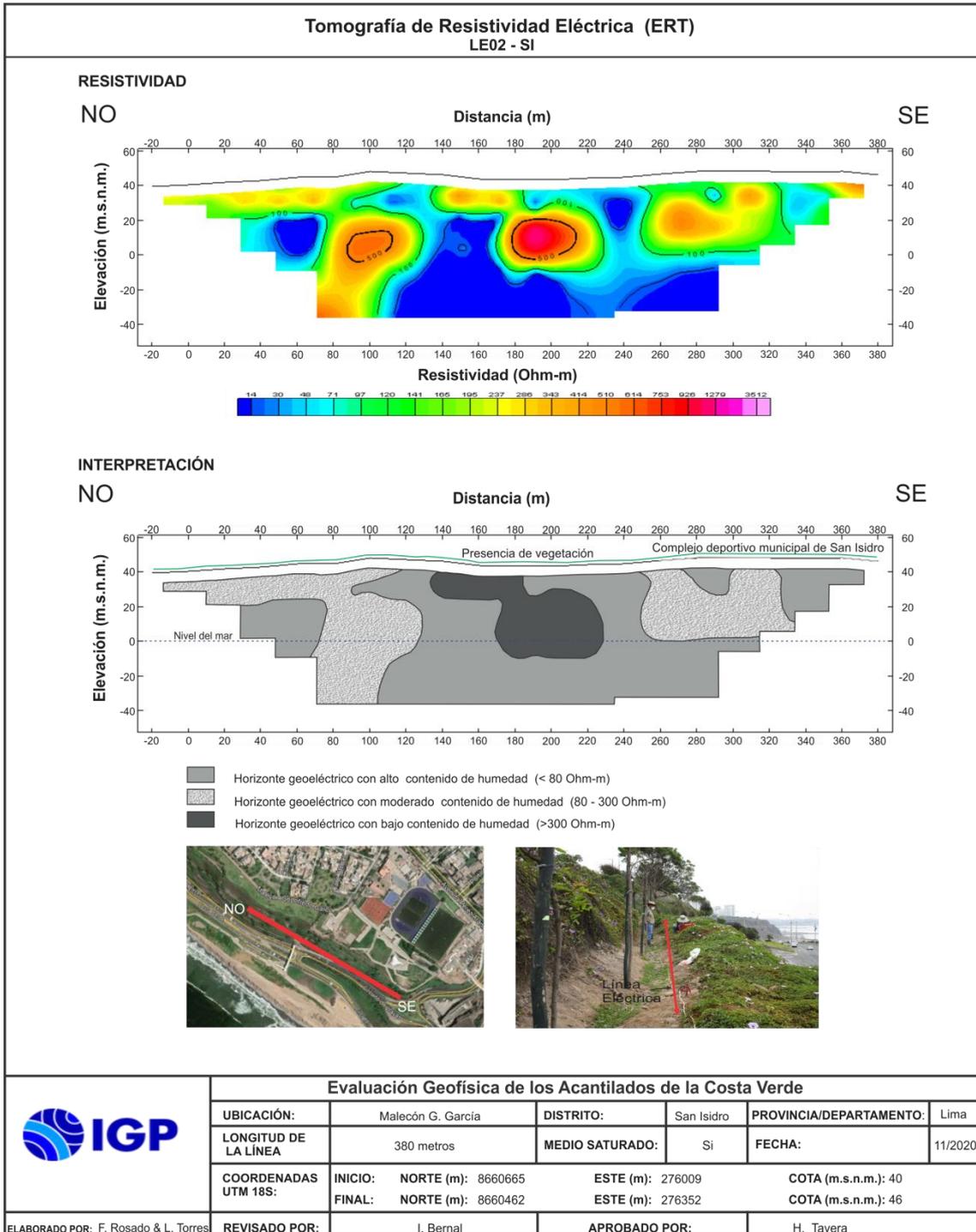
Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	393	662	5
2	664	1442	10
3	756	1874	31
4	916	2133	22
Semi-espacio	1198	2537	-

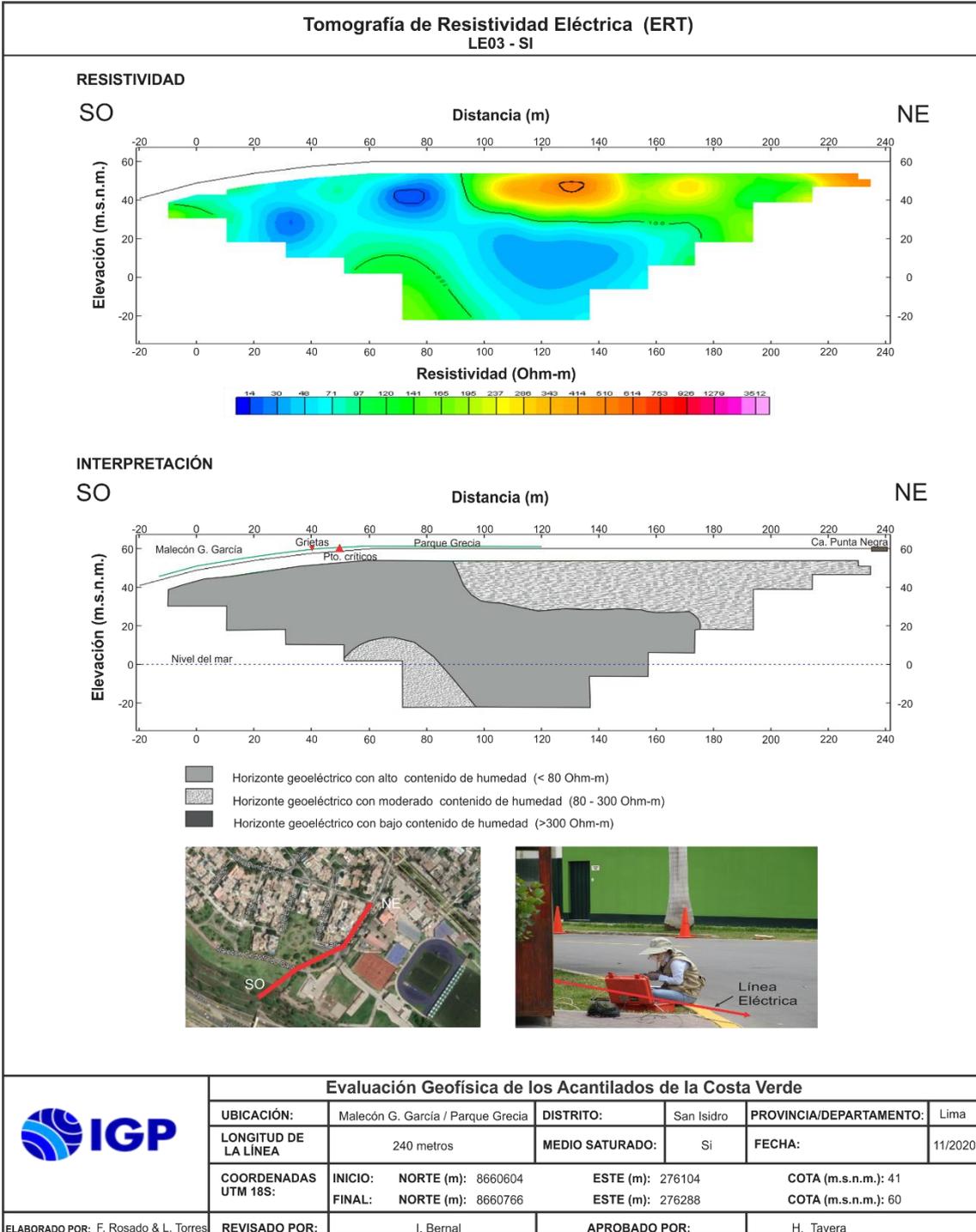
Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS06-MG.

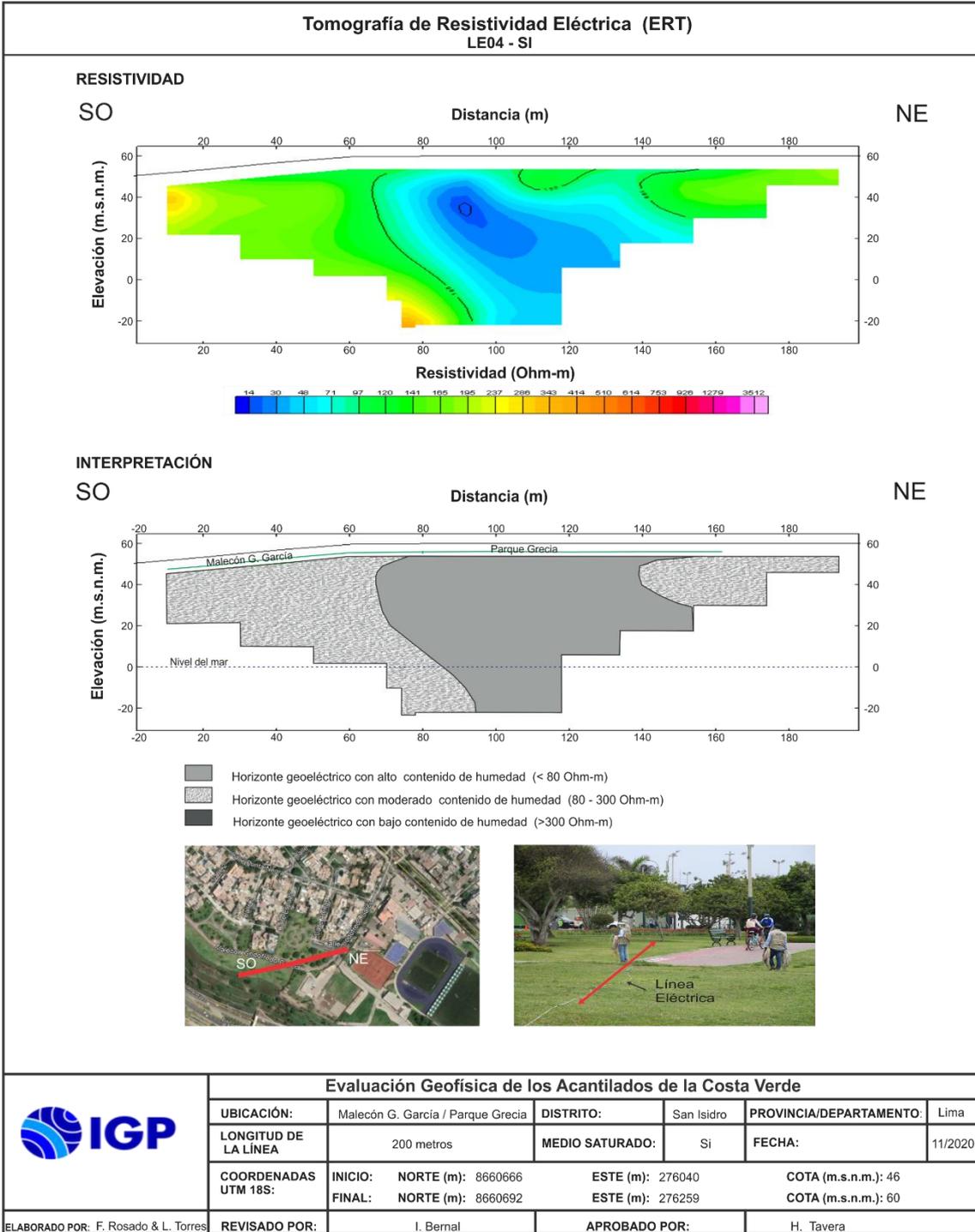
Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	207	454	5
2	421	815	10
3	553	1247	13
4	774	2237	22
Semi-espacio	970	2551	-

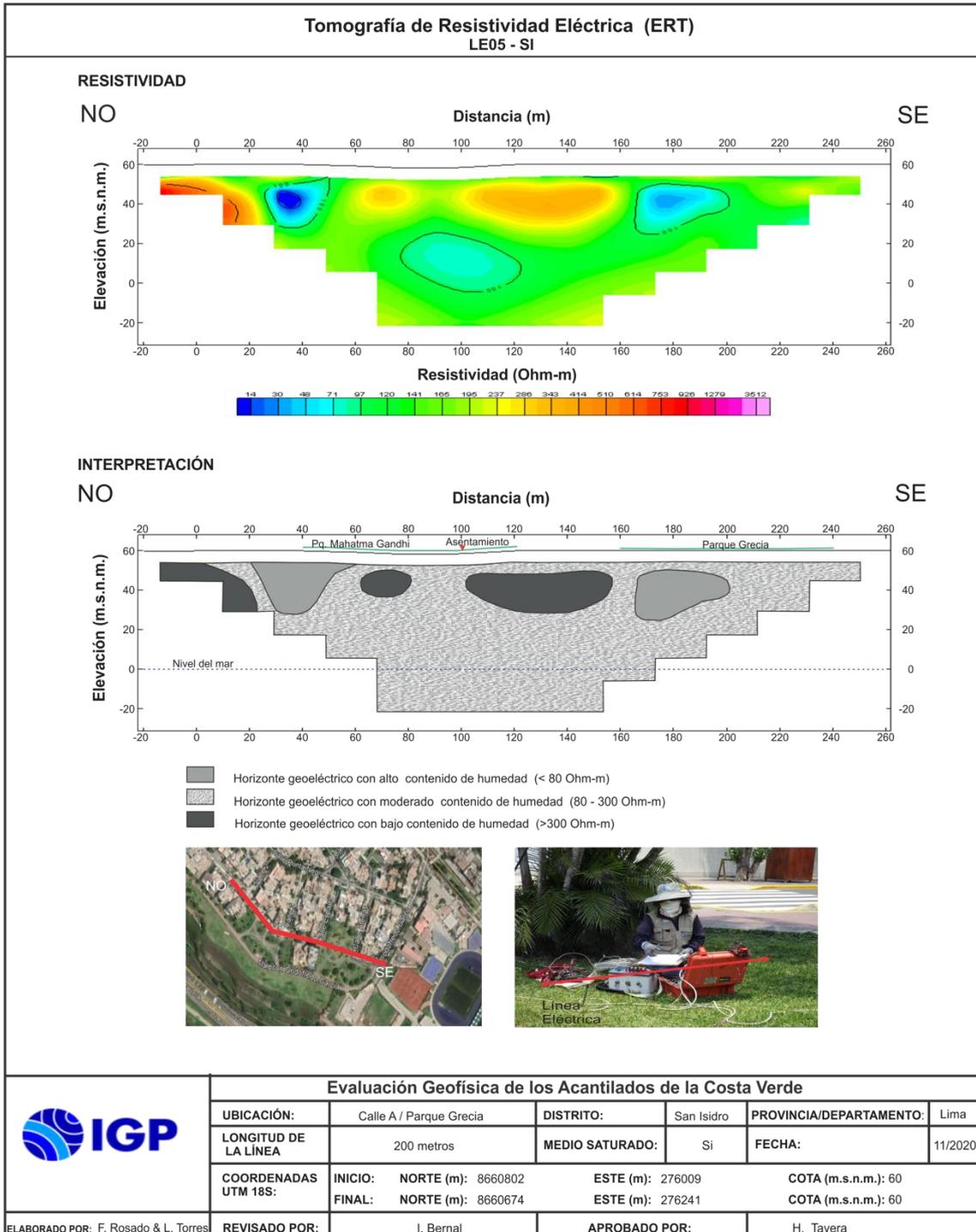
## **ANEXO IV. Secciones geoelectricas**

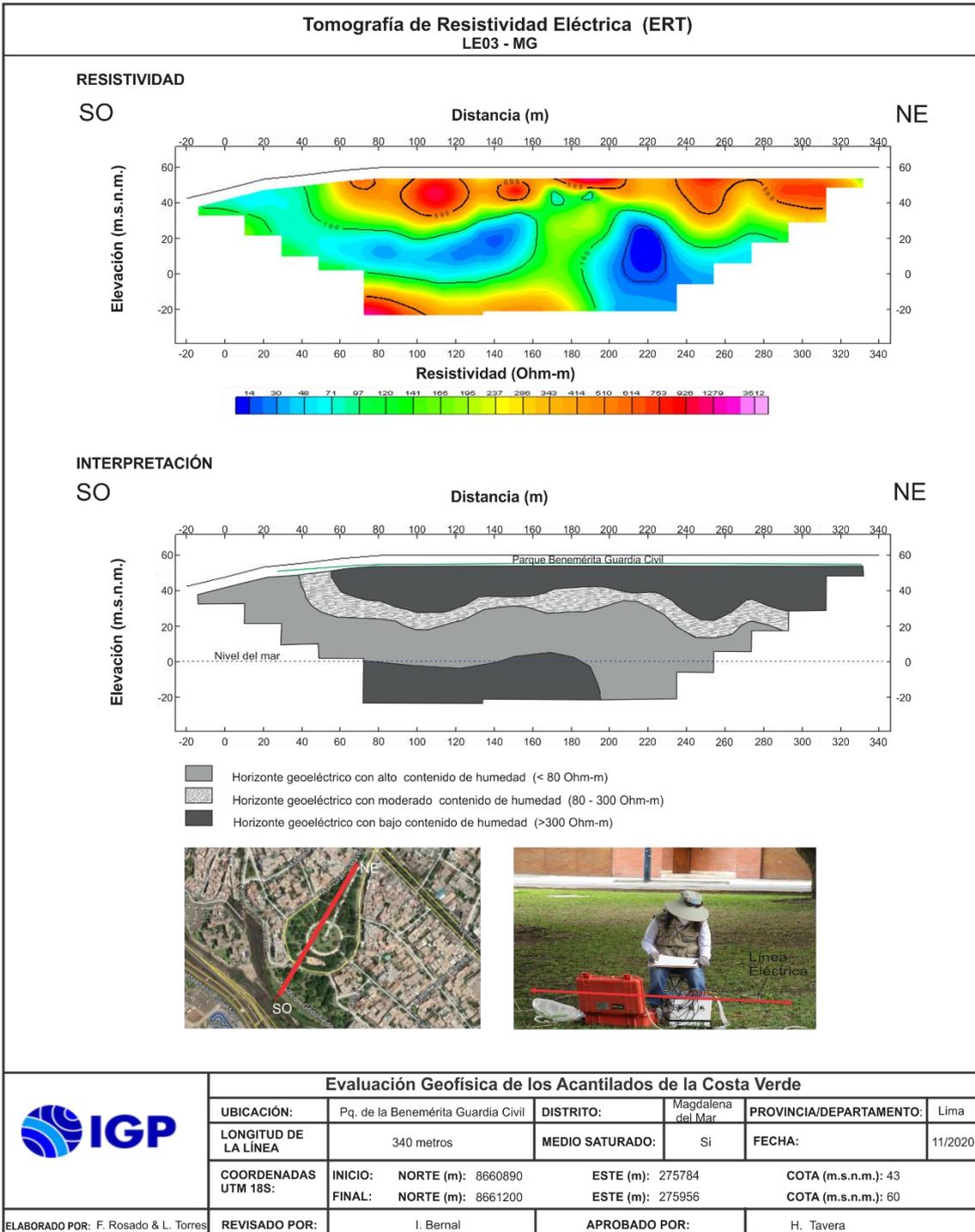












## ANEXO V. Secciones de Radargramas

