



EVALUACIÓN GEOFÍSICA DE LOS ACANTILADOS DE LA COSTA VERDE DISTRITO DE SAN MIGUEL

Informe Técnico Nº037-2021/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima - Perú Octubre, 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 Miguel

Autores

Isabel Bernal, Hernando Tavera y Wilfredo Sulla

Participantes:

Evaluación Geofísica: Kelly Pari / Wilfredo Sulla / 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 / Ademir Cuya.

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 MIGUEL

Lima - Perú Octubre, 2021

RESUMEN

En el Acantilado de la Costa Verde (ACV) del distrito de San Miguel, 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 compuestos por materiales de diferente rigidez: a) La primera capa con espesores de 4 a 6 metros está constituida por materiales aluviales poco consolidados (Vs=234-266 m/s, Vp=350-502m/s); b) La segunda capa con espesores de 9 a 20 metros, está constituida por materiales aluviales medianamente compactos (Vs=330-417 m/s Vp=502-1110 m/s), y c) La tercera capa, de ~32 metros de espesor está constituida por materiales aluviales compactos (Vs=537-700 m/s Vp=>1110m/s). Estos resultados coinciden con la profundidad de las interfaces en el subsuelo a 5 y 15 metros, definidas en función de la densidad de los materiales (1.6 gr/cm³, 1.9 gr/cm³, 2.2 gr/cm³).

En el parque Belén y a la altura del Jr. Rufino Echenique y la calle Maranga, se ha identificado la presencia de suelos compuestos por materiales menos consolidados en capas que superan los 20 metros de espesor; mientras que, en el parque Bertolotto, esta misma capa presenta espesores de 15 metros.

A lo largo del acantilado, se ha identificado la presencia de suelos con moderado a alto contenido de humedad en capas con espesores que varían de 25 a 40 metros, principalmente en el Jr. Rufino Echenique, Calle 19 y entre la calle Nicolás de Piérola y el parque Belén. En estos sectores, existen áreas verdes con riego continuo que facilitan la presencia de asentamientos y grietas en el terreno. En los parques Belén y Bertolotto, los asentamientos presentan desniveles de 2 a 3 metros y grietas de hasta 3 metros de profundidad. El comportamiento dinámico de los suelos en los ACV del distrito de San Miguel, 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 220 a 60 metros. Ante la ocurrencia de un sismo que genere elevados niveles de sacudimiento del suelo, las zonas con mayor riesgo son: parque Echenique; cruce de la Av. Costanera con la calle Cmdt. L. Espinar; parque Belén a la altura de la calle Miramar y la calle Los Lirios; Complejo Deportivo Municipal Juan Joya Cordero y al final del Jr. Diego de Agüero, límite con el distrito de Magdalena del Mar.

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

- 1.1.- Objetivo 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. Zonas de quebradas
- 3.3. Delimitación de zonas de mayor riesgo por sismo

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO I. Secciones de Refracción Sísmica ANEXO II. Perfiles MASW y MAM. ANEXO III. Tablas con parámetros sísmicos ANEXO IV. Secciones geoeléctricas 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 las diversas regiones a lo largo de la costa peruana (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 sismos, 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 moldeada 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 costanera 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 Acantilados 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 (UNI-CISMID), 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 producido en la ACV el 08 de agosto de 2019 (Fuente Diario Gestión)

Como parte del proyecto coordinado por CENEPRED, el IGP debe realizar trabajos 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 la ACV del distrito de San Miguel 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.-Objetivo del estudio

El objetivo del presente estudio es conocer la estructura del subsuelo en el ACV del distrito de San Miguel, 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; es decir, se delimita la zona de mayor riesgo ante la ocurrencia de sismos ya que se producirían asentamientos y deslizamientos de tierra y/o piedras 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, San Isidro, Miraflores, Barranco y Chorrillos. A lo largo de estos distritos los ACV tienen 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. En el distrito de San Miguel, los ACV tienen una longitud de ~4.0 km y alturas entre 40 a 50 metros con una inclinación de 50° a 60°. En la Figura 3, se presenta el mapa con la delimitación del área de estudio a escala 1:15000 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 sobre la superficie, tal es el caso de cárcavas, áreas de relleno, depósitos antrópicos, grietas, asentamientos y desplazamientos de tierra y piedras.



Figura 3. Mapa del área de estudio. La interlinea 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.

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 los estudios de geología, estratigrafía y geomorfología. Sin embargo, su comportamiento dinámico está asociado a la ocurrencia de sismos, lluvias, movimientos de masa, entre otros, y que puede ser conocido usando métodos geofísicos. En general, estos métodos permitirán, a partir del análisis e interpretación de los datos obtenidos directamente en el campo y 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 solicitación sísmica. Por ejemplo, los suelos blandos compuestos por sedimentos saturados de agua o rellenos antrópicos, a la ocurrencia de un sismo son susceptibles a generar deslizamientos ante la ocurrencia de sismos y/o fuerzas de gravedad.

Según la información geológica, los suelos del ACV en el distrito de San Miguel, están conformados por depósitos aluviales provenientes del río Rímac; es decir, gravas (bolonería) soportadas en matriz areno limosa y lentes de arenas (parte media de acantilado) tal como se observa en la Figura 4a. Asimismo, en los acantilados se ha identificado la presencia de áreas rellenadas con material alóctono (rellenos antrópicos) hasta alcanzar, en la actualidad, una altura promedio de 50 metros sobre el nivel medio de la Vía Costanera. 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 los pavimentos (Figura 4b).



Figura 4: a) Vista estratigráfica de los ACV del distrito de San Miguel. Obsérvese la presencia de depósitos aluviales y gravas sub redondeadas con intercalaciones de lentes de limos.



Figura 4. b) Asentamientos del suelo y grietas en los ACV. Foto tomada en el parque Belén a la altura de la calle Miramar, en el distrito de San Miguel.

2.1.- Método de Refracción Sísmica

El método de Refracción Sísmica (RS) permite conocer los parámetros físicos de los suelos como su espesor y rigidez en base al contraste de las velocidades de 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 Geometrics, 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 con espaciamiento entre geófonos de 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 de su accesibilidad.



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

En el distrito de San Miguel se realizaron, 03 líneas de RS con longitudes de hasta 335 metros y 20 líneas con longitudes de entre 66 y 138 metros (Tabla 1). La distribución espacial de estas líneas debidamente codificadas se muestra en la Figura 6. Durante la toma de datos de 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 el levantamiento geofísico.

Línea	Coordena WG	das UTM – S84	Cota	Espaciamiento entre geófonos	Longitud			
Sísmica	Este (m)	Este (m) Norte (m)		(m)	total (m)			
RS								
RS01-SM	270719	8663409	35	5	225			
	270891	8663802	36	5	335			
DCO2 CAA	272470	8662763	42	5	225			
K302-3M	272622	8663073	46	5	335			
DCO2 CAA	273580	8662261	51	5	225			
K303-3M	273736	8662573	54	5	335			
DEC A SAA	270668	8663563	35	4	02			
K304-3M	270748	8663517	35	4	92			
DEOF SAA	271441	8663202	35	4	92			
K303-3M	271527	8663169	35	4				
DCO4 CM	272901	8662596	47	4	92			
K300-3M	272981	8662548	47	4				
DEOT SAA	273608	8662243	51	5	115			
K307-3M	273709	8662183	51	5				
	270083	8664020	52	5	115			
K300-3/M	270189	8663975	52	5				
	270218	8663894	56	E	115			
K309-3M	270261	8663999	56	5	115			
RS10_SAA	270470	8663714	70	1	02			
K310-3M	270516	8663800	65	4	72			
RS11-SM	270925	8663537	49	3	69			
	270893	8663476	50	.				
RS12-SM	271196	8663381	53	4	92			
	271281	8663340	52	•	, _			
RS13-SM	271341	8663320	41	4	92			
	271427	8663286	42		. –			
RS14-SM	271869	8663239	69	3	69			
1314-3/0	271941	8663206	69		• /			

Tabla 1: Coordenadas y características de las líneas sísmicas.

Línea	Coordena WG	das UTM – S84	Cota	Espaciamiento entre geófonos	Longitud
Sísmica	Este (m)	Norte (m)	(m.s.n.m.)	(m)	total (m)
RS					
DC15 CAA	271801	8663174	50	4	120
K313-3M	271921	8663114	51	0	130
DC14 CAA	272136	8662968	52	5	115
K310-3/M	272180	8663076	51		115
DC17 CAA	272089 8662984		46	4	02
K317-5M	272173	8662964	46	4	72
DC10 CAA	272507	8662836	49	- 4	02
K310-3/M	272538	8662924	50		72
DS10 SAA	272460	8662818	57	- 4	92
K319-3/V	272543	8662780	58		
DC20 CAA	272771	8662665	62	4	02
K320-3/M	272857	8662641	63	4	72
DCO1 CAA	273134	8662646	65	2	66
K321-3/M	273194	8662612	65	്	00
RS22-SM	273075	8662564	58	2	40
	273139	8662532	60	3	09
DC22 CAA	273244	8662435	39	2	60
K523-5M	273290	8662384	47] <u></u> ປ	07

Tabla 1: Continuación.....//Coordenadas y características de las líneas sísmicas.

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.

En la Figura 7, se muestra como ejemplo el punto de disparo para la línea sísmica RS03-SM que se inicia en el parque Bertolotto y continúa en dirección del Jr. Sucre. Así como el sismograma que contiene las señales sísmicas obtenidas para esta línea.



Figura 6. Distribución espacial de las líneas de RS, codificadas como RS01-SM,..., RS23-SM.



Figura 7. Disposición del equipo de adquisición de datos con la técnica de refracción sísmica (RS03-SM, parque Bertolotto) 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 RS respectiva. En la Figura 8, se muestra un ejemplo de las curvas tiempo vs distancia para la línea sísmica RS03-SM.



Figura 8. Curvas de tiempo - distancia obtenidas para la línea sísmica RS03-SM.

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

ASTM - D5777			
Velocidad Vp	Descripción		
(m/s)			
240 - 610	Suelo intemperizado		
460 - 915	Grava o arena seca		
1830 - 1220	Arena saturada		
910 - 2750	Arcilla saturada		
1430 - 1665	Αgua		
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		

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

2.1.3.- Resultados e interpretación

a). Resultados

En el área de estudio se realizaron 23 líneas de RS, de las cuales 3 presentan resolución hasta una profundidad de 50 metros (RS01-SM, RS02-SM y RS03-SM) y el resto hasta los 30 metros (RS04-SM,..., RS23-SM). En la Figura 9, se presenta la sección de RS obtenida para la línea RS01-SM y en el Anexo I, para las líneas restantes, siendo sus características las siguientes: *Sección sísmica RS01-SM*: Línea realizada en el Jr. Rufino Echenique 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 – 8	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	12 – 25	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS02-SM: Línea realizada en la calle Cmdt. L. Espinar 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	1-8	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	8–16	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS03-SM: Línea realizada en el Jr. Sucre 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	1-5	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	5 – 10	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.



260

240

220

200

180

140

120

100

80

99

40

20

Distancia (m) 160

CAPA 3: > 1110 m/s

Av. La Paz

CAPA 1: 350 - 502 m/s

Av. Costanera

Borde del acantilado

40

A (SO)

CAPA 2: 502 - 1110 m/s

0 10

(.m.n.s.m) nòiɔɕvəl∃

20

30

-10 -20

ELABORADO POR: Figura 9. Resultados obtenidos con el método de refracción sísmica para la línea RS01-SM

-30

Perfil 2D de velocidad Vp

Refracción Sísmica

RS01-SM

San Miguel WGS84

DISTRITO: DATUM:

Jirón Echenique

335 mts.

LONGITUD DE LA LÍNEA:

UBICACIÓN:

Aluvial medianamente consolidado

Aluvial poco consolidado

ESTE (m) : 270719 ESTE (m) : 270891

NORTE (m) : 8663409 NORTE (m) : 8663802

INICIO A: FINAL A':

COORDENADAS UTM 18S: **REVISADO POR:**

W. Sulla

APROBADO POR

. Bernal

Sección sísmica RS04-SM: Línea realizada en la Av. Costanera (altura de la calle Echenique) y los resultados obtenidos, han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 3 capas con las siguientes características:

Сара	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	2 – 4	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	25 – 30	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS05-SM: Línea realizada en la Av. Costanera (altura de la calle Maranga) y los resultados obtenidos, han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 3 capas con las siguientes características:

Cap a	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	2 – 7	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	20 – 26	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS06-SM: Línea realizada en el parque Belén 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	2 – 4	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	9 - 18	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS07-SM: Línea realizada en el parque Bertolotto 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 – 4	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	6 – 9	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS08-SM: Línea realizada en la calle Chiclín 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 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	21 – 23	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS09-SM: Línea realizada en la calle Virú 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 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	21 – 24	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS10-SM: Línea realizada en la calle Santa Rosa 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 – 5	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	20 – 24	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS11-SM: Línea realizada en la residencial Las Brisas 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 – 8	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	14 – 15	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS12-SM: Línea realizada en la Av. Costanera altura de la calle 19 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	2 – 4	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	25 – 30	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS13-SM: Línea realizada sobre la Av. Costanera al costado de Maranguita y los resultados obtenidos, han permitido

Velocidad Espesor Capa Descripción Vp (m/s) (m) Material compuesto por depósitos aluviales 01 2 – 3 350 - 502 poco consolidados. Material compuesto por depósitos aluviales 02 5-6 502-1110 medianamente consolidados. Material compuesto por depósitos aluviales de 03 > 1110 mediana a altamente consolidados.

identificar en el subsuelo, la presencia de 3 capas con las siguientes características:

Sección sísmica RS14-SM: Línea realizada en la Av. La Paz, entre las calles Gamarra y Jorge Chávez 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	2 – 4	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	6 – 9	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS15-SM: Línea realizada en el Estadio Magallanes 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	2 – 5	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	8-14	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS16-SM: Línea realizada en el Jr. Nicolás de Piérola 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	2 – 5	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	12 – 15	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS17-SM: Línea realizada en la Av. Costanera altura del Jr. Nicolás de Piérola 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	2 – 4	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	10 - 14	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS18-SM: Línea realizada en la calle Cmdt. Espinar y los resultados obtenidos, han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 3 capas con las siguientes características:

Сара	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	3 – 4	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	7 – 10	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS19-SM: Línea realizada en la Av. Costanera altura de la calle Cmdt. Espinar y los resultados obtenidos, han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 3 capas con las siguientes características:

Сара	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	2 – 4	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	12 – 14	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS20-SM: Línea realizada en la Av. Costanera altura de la calle Miramar 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 – 5	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	18 – 20	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS21-SM: Línea realizada en la Av. Federico Gallese altura de la Av. La Mar 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 – 4	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	7 – 8	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS22-SM: Línea realizada en la Av. Bertolotto altura de la calle Independencia y los resultados obtenidos, han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 3 capas con las siguientes características:

Сара	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	5 – 6	350 – 502	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	12 – 14	502–1110	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1110	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

Sección sísmica RS23-SM: Línea realizada en el Centro Cultural Rey Juan Carlos I 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	2 – 5	334 – 710	Material compuesto por depósitos aluviales poco consolidados.
02	18 – 20	830–1467	Material compuesto por depósitos aluviales medianamente consolidados.
03	-	> 1586	Material compuesto por depósitos aluviales de mediana a altamente consolidados.

b) Interpretación

Del total de las secciones de RS, ocho se inician en el borde del acantilado (RS01-SM, RS02-SM, RS03-SM, RS09-SM, RS10-SM, RS11-SM, RS16-SM y RS18-SM) y se extienden en dirección noreste (área urbana); el resto de las secciones se realizaron paralelas al acantilado. En estas secciones se observa que los suelos menos consistentes y de mayor espesor (suelos no consolidados a medianamente consolidados) están presentes en las proximidades del acantilado. Estos suelos presentan espesores mayores a 25 metros por el parque Belén y del orden de 15 metros por el parque Bertolotto (Figura 10). Hacia el Jr. Rufino Echenique y la calle Maranga (extremo NE del distrito), los suelos están presentes en capas con espesores de aproximadamente 25 metros hasta una distancia de ~100 metros hacia el interior.



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 Miguel.

En general, se observa que conforme se incrementa la profundidad, los suelos son más compactos. En las secciones paralelas al acantilado (análisis horizontal), se observa que los suelos presentes en el extremo noroeste del ACV son menos consolidados en comparación con los suelos presentes en el extremo sureste del área de estudio.

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 Vs 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.

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 Geometrics, 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 el espaciamiento entre geófonos fueron variables, ya que dependió de la geomorfología y accesibilidad a la zona de estudio. 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 Miguel se realizaron 22 arreglos lineales MASW y MAM, y sus coordenadas de ubicación se muestran en la Tabla 3 y en la Figura 12, su distribución espacial en el área de estudio.

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).

Línea	Coordenadas	UTM – WGS84	Cota	Espaciamiento	Longitud total				
Sísmica	Este (m) Norte (m)		(m.s.n.m.)	entre geótonos (m)	ິ (m)				
MASW y MAM									
LS01-SM	270708	8663539	35	4	92				
LS02-SM	271483	8663186	36	4	92				
LS03-SM	271535	8663058	9	3	69				
LS04-SM	272923	8662882	49	3	69				
LS05-SM	272940	8662571	49	4	92				
LS06-SM	272893	8662453	10	3	69				
LS07-SM	271620	8663459	38	7	69				
LS08-SM	273653	8662498	54	3	69				
LS09-SM	273657	8662211	51	5	115				
LS10-SM	273511	8662112	7	4	92				
LS11-SM	270136	8663993	52	5	115				
LS12-SM	270483	8663767	64	4	92				
LS13-SM	270906	8663506	51	3	69				
LS14-SM	271387	8663303	41	4	92				
LS15-SM	271862	8663146	51	6	138				
LS16-SM	272153	8663025	50	5	115				
LS17-SM	272131	8662970	43	4	92				
LS18-SM	272524	8662871	47	4	92				
LS19-SM	273110	8662551	58	3	69				
LS20-SM	273263	8662408	44	4	92				
LS21-SM	273556	8662287	51	3	69				
LS22-SM	270696	8663604	57	3	69				

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

En la Figura 13, se muestra la disposición del equipo geofísico entre la calle Maranga y la Av. La Libertad y el registro sísmico obtenido con el método MASW. El sismograma contiene las señales sísmicas con presencia de bajo ruido ambiental y punto de golpe ubicado a una distancia de 6 metros al final de la línea sísmica.



Figura 12. Distribución espacial de las líneas MASW y MAM, codificadas como LS01-SM,..., LS22-SM.Los códigos en gris, corresponden a líneas realizadas en la zona baja del acantilado.



Figura 13. Disposición del equipo de adquisición de datos - MASW (calle Maranga – Av. La Libertad) y el 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 de velocidad Vs en una dimensión (1D) para el punto central de la línea, ver Figura 14.

Para el análisis de los resultados obtenidos, se considera la clasificación de suelos propuesta por la Norma de Diseño Sismorresistente (2018). En este caso, el rango de velocidad de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen, a fin de analizar con mayor detalle las velocidades de ondas que caracterizan a los suelos identificados en la zona de estudio, tal como se muestra en la Tabla 4.


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

Tabla 4. Clasificación de del tipo de suelo a partir de la Norma de Diseño Sismorresistente
(2018).

	Clasificación de los perfiles de Suelo							
N°	Vs (m/s)	Norma E.030		Vs (m/s) Norma E.0		Descripción		
1	< 180	S 3	Suelo blando	Material aluvial suelto				
2	180 a 350	\$2	Suelo	Material aluvial suelto a medianamente compacto				
3	350 a 500	- 52	32	52	rígido	Material aluvial medianamente compacto		
4	500 a 800	\$1	Roca o suelo	Material aluvial compacto				
5	800 a 1500	- 51	muy rígido	Material aluvial muy compacto				
6	> 1500	SO	Roca dura	Roca				

2.2.3.- Resultados e interpretación

a) Resultados

En el área de estudio se realizaron 22 líneas sísmicas MASW y MAM con resolución hasta una profundidad de ≈80 metros, tal como se muestra en la Figura 12. Los resultados obtenidos para la línea LS01-SM 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:

Línea sísmica LS01-SM: Realizada al borde del acantilado en la Av. Costanera, altura del Jr. Rufino Echenique. Este perfil permite identificar la existencia de cuatro (4) capas sísmicas: La primera de 4 metros de espesor y velocidades Vs de 266 m/s, y la segunda, de 9 metros de espesor y velocidades Vs de 330 m/s; ambas capas compuestas por material aluvial suelto a medianamente compacto. La tercera capa de 24 metros de espesor y velocidades Vs de 541 m/s compuesta por material aluvial compacto; mientras que, la cuarta capa presenta un espesor de 18 metros y velocidades Vs de 479 m/s compuesta por material aluvial medianamente compacto. En el semiespacio, se tiene velocidades Vs > 604 m/s y corresponderían a materiales aluviales compactos.

Líneas sísmicas LS02-SM: Realizada al borde del acantilado en la Av. Costanera, altura de la calle Maranga. Este perfil permite identificar la presencia de cuatro (4) capas sísmicas: La primera de 4 metros de espesor y velocidades Vs de 234 m/s y la segunda, de 14 metros de espesor y velocidades de 331 m/s; ambas compuestas por materiales aluviales sueltos a medianamente compactos. La tercera capa de 26 metros de espesor y velocidades Vs de 655 m/s, estaría compuesto por material aluvial compacto; mientras que, la cuarta capa presentaría un espesor de 14 metros y velocidades Vs de 493 m/s compuesta por material aluvial medianamente compacto. En el semiespacio, se tiene velocidades Vs > 746 m/s y corresponderían a materiales aluviales compactos.



Figura 15. Resultados obtenidos con la técnica MASW y MAM para la línea sísmica LS01-SM.

Línea sísmica LS03-SM: Realizada en el Circuito de Playas, próximo al mirador de San Miguel, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 76 metros. En este perfil se identifica la presencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 7 metros de espesor y velocidades Vs de 283 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto; y la segunda capa con un espesor de 13 metros y velocidades Vs de 386 m/s, compuesta por material aluvial medianamente compacto. La tercera capa tendría un espesor de 17 metros y velocidades Vs de 553 m/s; mientras que, el semiespacio presentaría velocidades Vs > 660 m/s, y en este caso, ambas capas estarían compuestas por material aluvial compacto.

Líneas sísmicas LSO4-SM: Realizadas en la calle Miramar que cruza con la Av. La Libertad. En este perfil se identifica la presencia de tres (3) capas sísmicas: La primera, de 5 metros de espesor y velocidades Vs de 214 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto y la segunda capa, de 29 metros de espesor y velocidades Vs de 430 m/s compuesta por material aluvial medianamente compacto. La tercera capa tendría un espesor de 16 metros y velocidades Vs de 596 m/s; mientras que, el semiespacio presentaría velocidades Vs > 771 m/s, y en este caso, ambas capas estarían compuestas por materiales aluviales compactos.

Línea sísmica LS05-SM: Realizada en la Av. Costanera, próximo al parque Belén, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 80 metros. En este perfil se identifica la presencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 5 metros de espesor y velocidades Vs de 255 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto y la segunda capa, de 20 metros de espesor y velocidades Vs de 417 m/s compuesta por material aluvial medianamente compacto. La tercera capa tendría un espesor de 32 metros y velocidades Vs de 600 m/s; mientras que, el semiespacio presentaría velocidades Vs > 741 m/s, y

en este caso, ambas capas estarían compuestas por material aluvial compacto.

Línea sísmica LSO6-SM: Ubicada en el Circuito de Playas, próximo a la "Cancha Azul", siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 78 metros. Este perfil permite identificar la presencia de cuatro (4) capas sísmicas: La primera de 5 metros de espesor y velocidades Vs de 242 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto y la segunda, de 15 metros de espesor y velocidades Vs de 387 m/s compuesta por material aluvial medianamente compacto. La tercera capa de 14 metros de espesor y velocidades Vs de 645, junto a la cuarta capa de 24 metros de espesor y velocidades Vs de 797 m/s, estarían compuestas por materiales aluviales compactos. El semiespacio presenta velocidades Vs > 665 m/s y estaría también compuesto por material aluvial compactos.

Líneas sísmicas LS07-SM: Realizada en la calle Maranga que cruza con la Av. La Libertad, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 72 metros. En este perfil se identifica la presencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 4 metros de espesor y velocidades Vs de 202 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto y la segunda capa, de 27 metros de espesor y velocidades Vs de 422 m/s compuesta por material aluvial medianamente compacto. La tercera capa tendría un espesor de 19 metros y velocidades Vs de 572 m/s; mientras que, el semiespacio presentaría velocidades Vs > 686 m/s, y en este caso, ambas capas estarían compuestas por materiales aluviales compactos.

Línea sísmica LSO8-SM: Realizada en el Jr. Arica, al costado del Colegio Ingeniería, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 64 metros. En este perfil se identifica la presencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 5 metros de espesor y velocidades Vs de 343 m/s compuesta por material suelto a medianamente compacto y la segunda, con un espesor de 8 metros y velocidades Vs de 551 m/s conformada por material aluvial compacto. La tercera capa con un espesor de 5 metros y velocidades Vs de 485 m/s estaría compuesto por material aluvial medianamente compacto; mientras que, el semiespacio presenta velocidades Vs > 669 m/s y estaría compuesto por material aluvial compacto.

Línea sísmica LS09-SM: Realizada en el parque Bertolotto, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 78 metros. Este perfil permite identificar la existencia de cuatro (4) capas sísmicas: La primera de 4 metros de espesor y velocidades Vs de 266 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto y la segunda de 9 metros de espesor y velocidades Vs de 395 m/s compuesta por material aluvial medianamente compacto. La tercera capa con 27 metros de espesor y velocidades Vs de 537 m/s; y la cuarta con 21 metros de espesor y velocidades Vs de 745 m/s, ambas compuestas por materiales aluviales compactos. En el semiespacio, se tiene velocidades Vs > 864 m/s y corresponderían a materiales aluviales muy compactos.

Línea sísmica LS10-SM: Realizada en el Circuito de Playas, próximo a los Domos de San Miguel, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 60 metros. En este perfil se identifica la presencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 9 metros de espesor y velocidades Vs de 283 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto y la segunda, con un espesor de 11 metros y velocidades Vs de 677 m/s conformada por material aluvial compacto. La tercera capa con un espesor de 17 metros y velocidades. La tercera capa con un espesor de 17 metros y velocidades. La tercera capa con un espesor de 17 metros y velocidades Vs de 1035 m/s que estaría compuesto por material aluvial compacto a muy compacto; mientras que, el semiespacio presenta velocidades Vs > 1259 m/s. *Línea sísmica LS11-SM*: Realizada en la calle Chiclín, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 76 metros. En este perfil se identifica la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 4 metros de espesor y velocidades Vs de 210 m/s, compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto. La segunda, de 7 metros de espesor y velocidades Vs de 311 m/s, compuesta por material aluvial medianamente suelto a medianamente compacto y la tercera capa de 17 metros de espesor y velocidades Vs velocidades Vs de 436 m/s compuesta por material aluvial aluvial metrial aluvial medianamente compacto. En el semiespacio, se tiene velocidades Vs > 613 m/s y correspondería a material aluvial compacto.

Líneas sísmicas LS12-SM: Realizada en la calle Santa Rosa, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 60 metros. En este perfil se identifica la presencia de cuatro (3) capas sísmicas: La primera de 5 metros de espesor y velocidades Vs de 219 m/s, compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto. La segunda, de 10 metros de espesor y velocidades Vs de 337 m/s, compuesta por material aluvial medianamente suelto a medianamente compacto. La tercera capa de 13 metros de espesor y velocidades Vs > 490 m/s, presentarían material aluvial medianamente compacto.

Línea sísmica LS13-SM: Realizada en la residencial Las Brisas San Miguel, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 58 metros. En este perfil se identifica la presencia de dos (2) capas sísmicas: La primera de 3 metros de espesor y velocidades Vs de 235 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto; y la segunda capa con un espesor de 12 metros y velocidades Vs de 327 m/s, compuesta por material aluvial medianamente suelto a medianamente compacto. El semiespacio presentaría velocidades Vs > 414 m/s, y estaría compuesta por material aluvial medianamente compacto.

Líneas sísmicas LS14-SM: Realizadas en la Av. Costanera, al costado de Maranguita, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 68 metros. En este perfil se identifica la presencia de dos (2) capas sísmicas: La primera de 5 metros de espesor y velocidades Vs de 303 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto; y la segunda capa con un espesor de 32 metros y velocidades Vs de 440 m/s, compuesta por material aluvial medianamente compacto, el semiespacio presentaría velocidades Vs > 611 m/s, en este caso, estaría compuesta por material aluvial compacto.

Línea sísmica LS15-SM: Realizada en estadio Magallanes, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 80 metros. En este perfil se identifica la presencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 5 metros de espesor y velocidades Vs de 285 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto. La segunda capa, de 23 metros de espesor y velocidades Vs de 429 m/s compuesta por material aluvial medianamente compacto. La tercera capa tendría un espesor de 15 metros y velocidades Vs de 610 m/s; junto con el semiespacio, con velocidades Vs > 771 m/s, ambas estarían compuestas por material aluvial aluvial compacto.

Línea sísmica LS16-SM: Realizada en el Jr. Nicolas de Piérola con la Av. Costanera, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 80 metros. En este perfil se identifica la presencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 4 metros de espesor y velocidades Vs de 252 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto. La segunda capa, de 24 metros de espesor y velocidades Vs de 431 m/s compuesta por material aluvial medianamente compacto. La tercera capa tendría un espesor de 33 metros y velocidades Vs de 607 m/s; mientras que, el semiespacio presentaría velocidades Vs > 695 m/s, en ambos casos, estarían compuestas por material aluvial compacto.

Líneas sísmicas LS17-SM: Realizada en la Av. Costanera altura de la calle Cmdt. Espinar, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 80 metros. En este perfil se identifica la presencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 7 metros de espesor y velocidades Vs de 237 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto, la segunda capa de 18 metros de espesor y velocidades Vs de 434 m/s compuesta por material aluvial medianamente compacto. La tercera capa tendría un espesor de 25 metros y velocidad Vs de 581 m/s; mientras que el semiespacio presentaría velocidad Vs > 708 m/s, en ambos casos, estarían compuestas por material aluvial compacto.

Línea sísmica LS18-SM: Realizada en la Av. Costanera, altura de la calle Miramar, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 80 metros. En este perfil se identifica la presencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 7 metros de espesor y velocidades Vs de 250 m/s compuesta por material suelto a medianamente compacto y la segunda, con un espesor de 18 metros y velocidades Vs de 377 m/s conformada por material aluvial medianamente compacto. La tercera capa con un espesor de 25 metros y velocidades Vs de 651 m/s; mientras que, el semiespacio presenta velocidades Vs > 784 m/s, ambas estarían compuestas por material aluvial compacto.

Línea sísmica LS19-SM: Realizada en la Av. Bertolotto con la calle Independencia, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 26 metros. Este perfil permite identificar la existencia de dos (2) capas sísmicas: La primera de 9 metros de espesor y velocidades Vs de 223 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto y la segunda de 11 metros de espesor y velocidades Vs de 342 m/s compuesta por material aluvial medianamente suelto a medianamente compacto. En el semiespacio, se tiene velocidades Vs > 494 m/s y corresponderían a material aluvial medianamente compacto.

Línea sísmica LS20-SM: Realizada en el Centro Cultural Rey Juan Carlos, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 80 metros. En este perfil se identifica la presencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 9 metros de espesor y velocidades Vs de 246 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto y la segunda, con un espesor de 19 metros y Vs de 417 m/s conformada por material aluvial medianamente compacto. La tercera capa con un espesor de 19 metros y velocidades Vs de 783, correspondería a material aluvial compacto. El semiespacio con velocidades Vs > 1025 m/s, correspondería a material aluvial muy compacto.

Línea sísmica LS21-SM: Realizada en el parque Bertolotto (Figura 12), siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 80 metros. En este perfil se identifica la presencia de cuatro (4) capas sísmicas: La primera de 5 metros de espesor y velocidades Vs de 240 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto, la segunda, con un espesor de 8 metros y Vs de 417 m/s conformada por material aluvial medianamente compacto. La tercera capa con un espesor de 20 metros y velocidades Vs de 566 m/s y la cuarta capa con un espesor de 20 metros y velocidades de 695, ambas corresponderían a material aluvial compacto. El semiespacio presenta velocidades Vs > 904 m/s y correspondería a material aluvial muy compacto.

Línea sísmica LS22-SM: Realizada en la Av. Costanera, altura de la Calle 2 de Mayo, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 68 metros. En este perfil se identifica la presencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 4 metros de espesor y velocidades Vs de 200 m/s compuesta por material aluvial suelto a medianamente compacto, la segunda con un espesor de 7 metros y Vs de 274 m/s conformada por material aluvial medianamente suelto a medianamente compacto. La tercera capa con un espesor de 26 metros y Vs de 362 m/s correspondería a material aluvial medianamente compacto; mientras que, el semiespacio presenta velocidades Vs > 543 m/s, corresponde a material aluvial compacto.

Finalmente, en la Tabla 5, se presenta el resumen de los valores de velocidades de ondas de corte (Vs) y espesores de capas obtenidos en cada uno de los perfiles del suelo. Asimismo, en el Anexo III, se muestra los parámetros sísmicos identificados para cada uno de los perfiles de velocidad.

b) Interpretación

Los perfiles de velocidad de ondas de corte obtenidos para el distrito de San Miguel permiten identificar la presencia en el subsuelo de 4 capas. Estas capas presentan diferente grado de compactación bien diferenciada en las cercanías del acantilado. Las características físicas y espesores de cada capa son discutidas a continuación:

Variación lateral de las propiedades físicas de los suelos: A lo largo del acantilado los suelos son menos consolidados (Vs<500 m/s) en comparación con los que se encuentran a mayores distancias hacia el área urbana. Estos suelos forman capas de 18 a 23 metros de espesor hacia el extremo noroeste del distrito, cerca al Jr. Rufino Echenique y la calle Maranga; mientras que, en dirección sureste, a la altura del parque Belén el espesor de la capa poco consolidada se incrementa a 25 metros (Figura 16), permitiendo la formación de grandes fisuras en el suelo, así como el desarrollo de importantes asentamientos visibles en superficie. Hacia el parque Bertolotto, los suelos menos compactos son parte de una capa de 13 metros de espesor.</p>

	Superfi	cie		Profundido					ndidad		
	N° DE CAPA										
	1		2		3		4		Semie	spacio	V\$30
Línea Sísmica	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)	(m/s)
LS01-SM	266	4	330	19	541	24	479	18	604	-	347
LS02-SM	234	4	331	14	655	26	493	14	746	-	391
LS03-SM	283	7	386	13	553	17	660	-	-	-	384
LS04-SM	214	5	430	29	596	16	711	-	-	-	361
LS05-SM	255	5	417	20	600	32	741	-	-	-	388
LS06-SM	242	5	387	15	645	14	797	24	665	-	392
LS07-SM	202	4	422	27	572	19	686	-	-	-	370
LS08-SM	343	5	551	8	485	5	669	-	-	-	513
LS09-SM	266	4	395	9	537	27	745	21	864	-	428
LS10-SM	283	9	677	11	1035	17	1259	-	-	-	515
LS11-SM	210	4	311	7	436	17	613	-	-	-	357
LS12-SM	219	5	337	10	428	13	490	-	-	-	342
LS13-SM	235	3	327	12	414	-	-	-	-	-	346
LS14-SM	303	5	440	32	611	-	-	-	-	-	401
LS15-SM	285	5	429	23	610	15	771	-	-	-	396
LS16-SM	252	4	431	24	607	33	695	-	-	-	399
LS17-SM	237	7	434	18	581	25	708	-	-	-	373
LS18-SM	250	7	377	18	651	25	784	-	-	-	351
LS19-SM	223	9	342	11	494	-	-	-	-	-	319
LS20-SM	246	9	417	19	783	19	1025	-	-	-	349
LS21-SM	240	5	417	8	566	21	695	20	904	-	424
LS22-SM	200	4	274	7	362	26	543	-	-	-	351
	 Aluvial suelto (Vs < 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 mux compacto (800 – 1500 m/s) 										

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

Roca (Vs > 1500 m/s)



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 Miguel.

Asimismo, en la Figura 16 se observa que el Jr. Rufino Echenique, la calle Maranga y el parque Belén, los suelos aluviales menos rígidos son parte de una capa de 30 metros de espesor con alto contenido de humedad debido al regado de parques y probablemente, a la presencia de antiguos drenajes presentes en este sector (Figura 17).



Figura 17. Identificación de antiguos drenajes de desagüe ubicados en el extremo noroeste del distrito de San Miguel (Imagen de Google Earth, 2003).

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 (ρ) 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 12 líneas de ERT, distribuidas en la zona de estudio, tal como se observa en la Figura 18. El instrumental utilizado en campo corresponde al equipo de Resistividad /IP Syscal Pro. En la Tabla 6, se detalla las características de las líneas ERT realizadas en los ACV del distrito de San Miguel.

Línea Eléctrica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Espaciamient o entre electrodos (m)	Longitud total (m)
	270716	8663516	27	20	200
LEOT-SM	270823	8663689	34	20	200
1602 644	271203	8663256	31	20	220
LEUZ-SM	271293	8663479	37	20	220
1602 644	272033	8662977	39	20	640
LEU3-SM	272615	8662692	37	20	840
	273570	8662270	46	20	200
LEO4-SM	273670	8662456	49	20	200
1 E05-SM	273519	8662319	49	20	280
LEUS-SM	273782	8662176	51	20	280
1606 SM	273428	8661944	5	20	220
LEUO-SM	273551	8662153	10		
	270629	8663596	31	20	240
LEO7-SM	270858	8663466	32		
	272669	8662679	43	- 20	480
LEU0-SM	273133	8662494	37		
LEOO-SM	271802	8663268	40	10	120
LE09-SM	271908	8663209	41		120
	272098	8662898	37	20	220
LETU-SM	272188	8663089	42	20	220
	272443	8662714	22	20	240
	272549	8662922	46	20	240
	272738	8662566	19	20	240
LE 1 2-3/W	272848	8662776	48	20	240

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

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 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.

*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

Tabla 7: Valores representativ	os de resistividad	(UNC, 20	00).
--------------------------------	--------------------	----------	------



Figura 18: Distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica (ERT), codificados como LE01-SM,..., LE12-SM. Los códigos en gris, corresponden a líneas realizadas en la zona baja del acantilado.

2.3.3.- Resultados e interpretación

a) Resultados

En el distrito de San Miguel se realizaron 12 secciones geoeléctricas, con resolución hasta los 50 metros de profundidad. En la Figura 19, se presenta la sección geoeléctrica para la línea LE01-SM y en el Anexo IV, para las secciones restantes. El análisis realizado para cada sección geoeléctrica y/o tomografía eléctrica, permite tener los siguientes resultados:

-Sección geoeléctrica LE01-SM: Realizada en el Jr. Rufino Echenique sobre una longitud de 200 metros y en dirección SO-NE (perpendicular al acantilado). En esta sección se han identificado la presencia de 2 horizontes geoeléctricos: El primero con moderado contenido de humedad hasta una profundidad que varía de 5 a 20 metros. En el tramo inicial de este horizonte (borde del acantilado), predominan los valores mayores de resistividad (>300 Ohm-m) hasta una profundidad de 10 metros; mientras que, en su tramo central, a la altura de la Av. Costanera, las profundidades se incrementan hasta los 20 metros. El segundo horizonte, presenta alto contenido de humedad con espesores mayores a los 30 metros.

-Sección geoeléctrica LEO2-SM: Realizada en Calle 19 sobre una longitud de 220 metros y en dirección SO-NE (perpendicular al acantilado). En esta sección se ha identificado, a nivel superficial, la presencia de dos zonas anómalas de moderada y alta resistividad. La zona de moderada resistividad (80 a 300 Ohm-m) alcanza una profundidad de 20 metros y se encuentra entre las avenidas Costanera y La Paz (próximo a Maranguita). La zona de alta resistividad (>300 Ohm-m) presenta una profundidad de 20 metros en el borde del acantilado y conforme se avanza hacia la zona urbana, presenta mayor profundidad hasta una distancia de 10 metros. Asimismo, entre el borde del acantilado y la Av. Costanera, se observa el predominio de depósitos con alto contenido de humedad que se extienden a mayores profundidades.



Figura 19: Resultado de tomografía eléctrica para la línea LEO1-SM.

-Sección geoeléctrica LE03-SM: Realizada en la Av. Costanera sobre una longitud de 640 metros y en dirección NO-SE (paralela al acantilado). En esta sección se ha identificado la presencia de 2 horizontes geoeléctricos: El primero de moderada resistividad (80 a 300 Ohm-m), está presente en el tramo central de la sección hasta una profundidad de 5 a 20 metros y con mayor espesor a la altura de la calle Inclán. 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 de las calles Nicolás de Piérola (hacia el inicio de la sección) y Cmdt. L. Espinar, puesto en evidencia con la presencia de diversas grietas y asentamientos de suelos visibles en superficie.

-Sección geoeléctrica LE04-SM: Realizada en el Jr. Sucre sobre una longitud de 200 metros y en dirección SO-NE (perpendicular al acantilado). En esta sección predominan los depósitos de alta resistividad (>300 Ohm-m) debido a la presencia de materiales aluviales con bajo contenido de humedad. Sin embargo, a nivel superficial hacia el tramo inicial de esta sección, entre el borde del acantilado y el parque Media Luna, existen depósitos con moderado contenido de humedad, que alcanzan espesores de hasta 15 metros., debido probablemente al riego de áreas verdes de los parques Media Luna y Bertolotto.

-Sección geoeléctrica LE05-SM: Realizada en la Av. Bertolotto sobre una longitud de 280 metros y en dirección NO-SE (paralela al acantilado). En esta sección se ha identificado la presencia de un horizonte geoeléctrico de moderada resistividad (80 a 300 Ohm-m), presente en toda la sección hasta una profundidad de ~15 metros. Por debajo de este horizonte y entre las calles Sucre, Simón Bolívar y el parque Bertolotto (extremo NO de la sección), se identifica la presencia de un depósito con moderado a alto contenido de humedad. Asimismo, entre el Jr. Simón Bolívar y Jr. San Martin (extremo SE de la sección), se ha identificado la existencia de una zona con bajo contenido de humedad y que desde el acantilado, ha sido acondicionada como vía de acceso para la zona de playa.

-Sección geoeléctrica LE06-SM: Realizada en el Circuito de Playas (a la altura del parque Bertolotto) sobre una longitud de 220 metros y en dirección SO-NE. En esta sección predominan depósitos de baja resistividad (<80 Ohm-m) debido a la presencia de materiales aluviales con alto contenido de humedad. A nivel superficial, predominan depósitos con moderado contenido de humedad hasta una profundidad de 10 metros, debido probablemente a la compactación de los materiales depositados en este sector.

-Sección geoeléctrica LE07-SM: Realizada en la Av. Costanera, sobre una longitud de 240 metros y en dirección NO-SE (paralela al acantilado). En esta sección se ha identificado la existencia de 2 horizontes geoeléctricos: El primero con moderado contenido de humedad hasta una profundidad de 10 a 25 metros; presentándose el mayor espesor entre la calle 2 de Mayo y Jr. Rufino Echenique; y el segundo horizonte, con alto contenido de humedad presente a la altura del Jr. Rufino Echenique y la calle Aviación, y con espesores mayores a los 30 metros.

-Sección geoeléctrica LEO8-SM: Realizada en la Av. Costanera, sobre una longitud de 480 metros y con orientación NO-SE (paralela al acantilado). En esta sección de ha identificado la presencia de dos zonas anómalas a nivel superficial de moderada y alta resistividad. La zona de moderada resistividad presenta espesores de 20 a 25 metros (80 a 300 Ohm-m) y se encuentra ubicada desde la calle Cmdt. Espinar (inicio de la sección), hasta una distancia de 200 metros cercana a la calle Lirios. La zona de alta resistividad (>300 Ohm-m) está ubicada entre las calles Lirios y Castilla compuesta por depósitos aluviales secos y con un espesor de 20 metros. Por debajo de estas capas, predomina la presencia de un horizonte geoeléctrico con resistividades menores a 80 Ohm-m debido a la presencia de depósitos aluviales con alto contenido de humedad.

-Sección geoeléctrica LEO9-SM: Realizada en la Av. La Paz sobre una longitud de 120 metros y en dirección NO-SE (paralela al acantilado). En esta sección predominan depósitos de baja resistividad (<80 Ohmm) a la altura del estadio Magallanes (entre los 20 y 70 metros de distancia de la sección), debido a la presencia de materiales con alto contenido de humedad hasta los 20 metros de profundidad. A mayor profundidad y hacia los extremos de la sección, en dirección de la calle Gamarra y Bernardo Alcedo, el material presenta moderado a bajo contenido de humedad.

-Sección geoeléctrica LE10-SM: Realizada en la calle Nicolás de Piérola sobre una longitud de 220 metros y en dirección SO-NE (perpendicular al acantilado). En esta sección predominan materiales aluviales con alto contenido de humedad. Sin embargo, conforme se tiende hacia la Av. La Paz, la humedad disminuye hasta los 20 metros de profundidad.

-Sección geoeléctrica LE11-SM: Realizada en la calle Cmdt. L. Espinar, sobre una longitud de 240 metros y en dirección SO-NE (perpendicular al acantilado). En esta sección y, hacia el extremo SO, predominan los depósitos de materiales aluviales con alto contenido de humedad que afloran entre la Av. Costanera y el borde del acantilado. Asimismo, a nivel superficial y en dirección de la Av. La Paz (NE), se ha identificado la existencia de zonas cuyo material presenta moderado contenido de humedad. -Sección geoeléctrica LE12-SM: Realizada en la calle Miramar sobre una longitud de 240 metros y en dirección SO-NE (perpendicular al acantilado). En esta sección y a la altura de la Av. Costanera predominan materiales aluviales con alto contenido de humedad en una capa de con espesores mayores a 50 metros. Hacia la Av. La Paz, el material húmedo se presenta a nivel superficial en capas con espesores de hasta 10 metros.

b) Interpretación

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

- Hacia el extremo noroeste del distrito (Av. Costanera y Jr. R. Echenique), se ha identificado a nivel superficial la presencia de una capa de suelos de 25 metros de espesor con moderado contenido de humedad. A mayor profundidad, el subsuelo presenta alto contenido de humedad (Figura 20, Línea LE07-SM).

A la altura del Jr. Echenique, en el borde del acantilado, se identifica la presencia de una anomalía con valores altos de resistividad coherente para suelos secos; sin embargo, este efecto se asocia a la poca consistencia del material presente en este sector. A pocos metros de esta anomalía, sobresale la presencia de suelos con alta humedad que evidencia su inestabilidad de este sector (Figura 20, Línea LE01-SM).

Por otro lado, a la altura de la Calle 19 (Maranguita), entre el borde del acantilado y la Av. Costanera, los suelos presentan alto contenido de humedad (Figura 20, Línea LE02-SM). -En zona central del distrito (entre las calles Jorge Chávez y Castilla), paralelo al acantilado se ha identificado, a nivel superficial, la presencia de suelos con moderado contenido de humedad en capas de hasta 25 metros de espesor. Dentro de esta capa sobresalen anomalías, que presentan suelos con bajo contenidos de humedad, entre la calle Los Lirios y el acceso a la Av. Universitaria. Por debajo de esta capa, el subsuelo presenta depósitos aluviales con alto contenido de humedad. En esta zona, se encuentra presente la mayor extensión de áreas verdes que son regadas continuamente, dando origen a problemas geotécnicos que generan asentamientos de terreno y la formación de grietas en el suelo, tal como ocurre en el parque Belén y en las inmediaciones de la comisaría de San Miguel. A nivel superficial se ha identificado la presencia de materiales con bajo contenido de humedad entre la calle Los Lirios y el Jr. Independencia en capas de 20 a 30 metros (Figura 20, Líneas LE03-SM y LE08-SM).

Sobre la calle Miramar, perpendicular al acantilado, se ha identificado la presencia de suelos con moderado y alto contenido de humedad en capas de 40 metros de espesor (Figura 20, Línea LE12-SM).

-Hacia el extremo sureste del distrito (entre la calle Grau y Jr. San Martín), paralelo al acantilado, se ha identificado la presencia de una capa de suelos con moderado contenido de humedad, dentro del cual sobresalen sectores del subsuelo que presentan, alto contenido de humedad a los 20 y 5 metros de profundidad (altura del Jr. Sucre y Jr. San Martin) y otro con bajo contenido de humedad a la altura del Jr. Bolivar (Figura 20, Líneas LE05-SM).



Figura 20. Ubicación y orientación de las líneas de tomografía eléctrica realizadas en el extremo NO (LE07-SM), Central (LE03-SM y LE08-SM) y SE (LE05-SM) de los Acantilados de la Costa Verde. Las interlineas delimitan las zonas con mayor contenido de humedad en cada sección y su proyección en el perfil del acantilado.



Figura 20. ...Continuación.../. Ubicación y orientación de las líneas de tomografía eléctrica realizadas en el extremo NO (LE01-SM, LE02-SM), Central (LE12-SM) y SE (LE04-SM) de los Acantilados de la Costa Verde. Las interlineas delimitan las zonas con mayor contenido de humedad en cada sección y su proyección en el perfil del acantilado.

-Hacia el extremo sureste del distrito (entre las calles Bolognesi y San Martín), se ha identificado suelos con moderado contenido de humedad en capas de 15 metros de espesor en dirección del acantilado. A mayor profundidad los suelos no muestran humedad (Figura 20, Línea LE04-SM).

De acuerdo a las secciones eléctricas, realizadas próximas al borde del ACV, se ha identificado la presencia de suelos con alto contenido de humedad. Por ejemplo, Jr. R. Echenique, Jr. Nicolás de Piérola y calle Miramar, donde se ha identificado la presencia de suelos con alto contenido de humedad en una capa que supera los 30 metros. De manera local, al borde del acantilado, los suelos con niveles altos de humedad se encuentran en capas de 5 a 10 metros de espesor en la Av. Costanera a la altura de la Calle 8, parque Belén, parque Media Luna, Jr. Nicolás de Piérola, Jr. Cmtd. Espinar y Jr. Sucre. Estos niveles de humedad identificados sugieren que estos suelos representan un alto peligro a la ocurrencia de sismos.

2.4.- Método de Georadar

El georadar es una técnica no destructiva orientada al estudio del subsuelo a nivel superficial y que se fundamenta en la capacidad de las ondas de radar de baja frecuencia (10 MHz - 2,5 GHz) para propagarse a través de medios poco conductivos y 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 será 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

21), similares a los registros clásicos de sísmica 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 21. Esquema de base para el método de georadar y ejemplo del registro de un radargrama (Villela, 2013)

2.4.1.- Adquisición de datos

La exploración del subsuelo se realizó con un georadar marca GSSI, antenas de 350 MHz y 100 MHz. La capacidad de penetración de la onda electromagnética depende de las condiciones de conductividad y permisividad del subsuelo, llegando con la antena de 350 MHz a profundidades de 6 metros y con la antena de 100 MHz, hasta 20 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 (200 scan/segundos) y una configuración por distancia de odómetro de 20 metros (Figura 22).

En el distrito de San Miguel se realizaron 20 líneas de GPR (19 líneas con la antena de 350 MHz y 1 con la de 100 MHz) cuyas coordenadas son indicadas en la Tabla 8 y su distribución espacial en la Figura 23.



Figura 22. Disposición del georadar utilizando las antenas de 100 MHz y 350 MHz.

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.

	Línea GPR	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Longitud total (m)	Antena (MHz)
1	CPPO1 SM	270836	8663699	47	204	250
I	GFR01-3M	270724	8663514	45	200	350
2	C PPO2 SM	270673	8663579	44	204	250
2	GFR02-3M	270856	8663475	44	200	350
2	CPPO2 SM	270661	8663551	46	164	250
3	Gr K03-3/M	270836	8663438	44	104	350
4		271315	8663506	48	245	250
4	GFR04-3M	271214	8663260	45	205	350
5	CPPOS SM	271186	8663343	44	142	250
5	GFR05-3M	271324	8663291	44	142	350
4	CPRO4 SM	271330	8663310	44	644	250
0	GFR00-3M	271917	8663045	43	044	350
7	CPPOZ SM	272760	8662652	46	050	100
	GFRU7-3M	271929	8663043	37	952	100
•		272725	8662664	49	200	250
8	GPR08-5M	272997	8662545	51	299	350
•		272854	8662797	51	152	350
9	GPR09-5M	272785	8662645	49		
10		272931	8662908	54	133	250
10	GFRTU-3M	272878	8662784	53		330
11		273010	8662553	51	80	250
11	GFRTT-3M	273142	8662529	47	80	350
10		273156	8662508	65	240	250
12	GPR12-5M	273371	8662404	65	240	350
10		273232	8662463	65	111	250
13	GPR13-5M	273284	8662567	69		350
14		273890	8662133	59		250
14	GPR14-5M	273501	8662335	58	444	350
16		273510	8662321	59	225	250
15	GPRID-SM	273795	8662150	62	325	350
1/		273583	8662262	60	4.40	250
10	GPRI0-5M	273788	8662660	65	448	350
17		273253	8662432	38	14	250
17	GPR1/-SM	273247	8662419	37		350
10		270044	8663940	40	602	250
18	GPK18-5M	270558	8663660	48		350
10	CPB10 SH	270863	8663495	46	270	050
19	GPR19-5M	271097	8663360	44		350
20	CPP20 SH	272123	8662921	48	20/	250
20	GFKZU-SM	272230	8663182	49	- 286	350

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



Figura 23. Distribución espacial de las líneas de GPR, codificadas como GPR01-SM,..., GPR20-SM.

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 24).



Figura 24. 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 20 líneas de GPR con resolución hasta los 6 metros (350 MHz) y 20 metros (100 MHz) de profundidad. Los resultados obtenidos para la línea GPR01-SM se muestran en la Figura 25 y en el Anexo V, para las líneas restantes. El análisis realizado para cada línea GPR permite tener los siguientes resultados:

Línea GPR01-SM: Realizada en el Jr. Rufino Echenique, con una longitud de 206 metros y orientada en dirección NE a SO perpendicular al acantilado. En la línea se identifica la existencia de una capa de 1.5 metros de espesor conformado por materiales heterogéneos. Se presentan grietas sobre la prolongación del Jr. Rufino Echenique, que alcanzan profundidades de 2 metros. Asimismo se presentan anomalías con un grado de deformación debido a la presencia de asentamiento de suelos, entre Jr. Rufino Echenique y la Av. Costanera (Figura 25).

Línea GPR02-SM: Realizada en las proximidades de la Av. Costanera con una longitud de 206 metros y orientada en dirección NO a SE paralela al acantilado. En esta línea se identifica la presencia de una capa de 1.5 metros de espesor conformado por materiales heterogéneos. Se observa grietas a la altura de la prolongación del Jr. Rufino Echenique, alcanza una profundidad de 2 metros. Asimismo, la presencia de anomalías de material deformado debido a la presencia de áreas de asentamiento de suelos a la altura del Jr. Rufino Echenique.

Línea GPR03-SM: Realizada a lo largo del acantilado con una longitud de 164 metros y orientada en dirección NO a SE. En la línea se identifica la existencia de una capa de 1.5 metros de espesor conformado por materiales heterogéneos. Asimismo, la presencia de una anomalía puntual a una distancia de 172 metros, desde el inicio de la línea, debido a la presencia de un elemento metálico.



Figura 25. Resultados obtenidos con la técnica de georadar para la línea GPR1-SM.

Línea GPR4-SM: Realizada en la Calle 19 con una longitud de 265 metros y orientada en dirección NE a SO, perpendicular al acantilado. En la línea se observa la presencia de una capa de 2 metros de espesor conformado por material heterogéneo. Asimismo, se observa la presencia de asentamientos, grietas y pliegues de suelo entre el borde del acantilado y la Av. Costanera. Estas grietas llegarían hasta una profundidad de 2 metros.

Línea GPR5-SM: Realizada en la Av. Costanera con una longitud de 142 metros y orientada en dirección NO a SE, paralela al acantilado. En la línea se identifica la presencia de una capa de 2 metros de espesor conformado por material heterogéneo. Asimismo, se identifica la existencia de un reflector hiperbólico a 16 metros de distancia del inicio de la línea y que corresponde a una cavidad puesta en evidencia en superficie por la presencia de un desnivel. Asimismo, sobresalen anomalías en forma de pliegues a la altura de Maranguita y que estarían asociadas a la presencia de asentamientos del suelo.

Línea GPR6-SM: Realizada en la Av. Costanera con una longitud de 644 metros y orientada en dirección NO a SE, paralela al acantilado. En la línea se identifica la presencia de una capa de 1 metro de espesor conformado por material heterogéneo. Asimismo, la presencia de anomalías en forma de pliegues a la altura de la calle Gamarra sobre la Av. Costanera y que se deberían a la presencia de una estructura.

Línea GPR7-SM: Realizada en la Av. Costanera, con una longitud de 952 metros y orientada en dirección de SE a NO, paralela al acantilado. Para la exploración del suelo se utilizó una antena de 100 MHz, llegándose a identificar un cambio de material a 4 metros de profundidad. Asimismo, se tiene la presencia de reflectores asociados a la existencia de fisuras o grietas a la altura de las calles Nicolás de Piérola y Cmdt. L. Espinar, que presentarían profundidades de hasta 2 metros.

Línea GPR8-SM: realizada en la Av. Costanera, cerca al parque Belén, con una longitud de 133 metros y orientada en dirección NO a SE, paralela al acantilado. En esta línea se identifica la presencia de una capa hasta los 2 metros de profundidad, compuesta por material heterogéneo. Asimismo, tenemos la presencia de grietas a la altura del parque Belén, que alcanzan profundidades de 1.5 metros. Algunas de estas fisuras son visibles en superficie.

Línea GPR9-SM: Realizada en la calle Miramar con la Av. Costanera, con una longitud de 168 metros y orientada en dirección NE a SO, perpendicular al acantilado. En esta línea se identifica la presencia de una capa de 4 metros de espesor conformado por material heterogéneo. Se presenta grietas a la altura de la primera cuadra de la calle Miramar con una profundidad de 1 metro. Asimismo, se observa anomalías a lo largo del perfil asociadas a la presencia de buzones y tuberías.

Línea GPR10-SM: Realizada en la calle Miramar con una longitud de 299 metros y orientada en dirección NE a SO. En la línea se identifica la presencia de una capa hasta los 3.5 metros de profundidad conformado por material heterogéneo. Asimismo, se observa anomalías puntuales a lo largo de la segunda cuadra de la calle Miramar asociada a la presencia de buzones y tuberías.

Línea GPR11-SM: Realizada en la Av. Bertolotto con una longitud de 80 metros y orientada en dirección SE a NO, paralela al acantilado. En esta línea se identifica la presencia de una capa de 2.5 metros de espesor conformado por material heterogéneo y la presencia de anomalías en forma de pliegues entre el Jr. Independencia y calle La
Mar. Los reflectores semi planos dispersos son característicos de la presencia fisuras o grietas que llegan hasta 1.5 metros de profundidad a la altura del Jr. Independencia.

Línea GPR12-SM: Realizada en la Av. Bertolotto con una longitud de 240 metros y orientada en dirección NO a SE, paralela al acantilado. En esta línea se observa la presencia de una capa de 2.5 metros de espesor conformado por materiales heterogéneos con un cambio en sus propiedades físicas a la profundidad de 1 metro. Asimismo, se identifica la existencia de anomalías entre las calles Mariscal Ramón Castilla y Alfonso Ugarte sobre la Av. Bertolotto asociadas a zonas de asentamientos que en superficie presentan los mayores desniveles del suelo.

Línea GPR13-SM: Realizada en la calle Castilla con una longitud de 111 metros, orientada en dirección NE a SO, perpendicular al acantilado. En esta línea se observa la presencia de una capa que se extiende hasta los 3 metros de profundidad conformada por materiales heterogéneos. Asimismo, la existencia de anomalías a la altura de la primera cuadra de la calle Castilla que podrían estar asociadas a la presencia de grietas hasta una profundidad 0.5 metros. Del mismo modo, se tiene una anomalía hasta 0.5 metros de profundidad debido a la presencia de una zona de asentamiento y/o desnivel en la pista; además de anomalías puntuales a los largo de la calle Castilla debido a la existencia de buzones y tuberías.

Línea GPR14-SM: Realizada en la Av. Bertolotto con una longitud de 444 metros y orientada en dirección SE a NO, paralela al acantilado. En esta línea se identifica, hasta una profundidad de 2.5 metros, la presencia de una capa conformada por materiales heterogéneos. Asimismo, se tiene la presencia de anomalías en forma de pliegues a lo largo del perfil debido a la existencia de fisuras o grietas hasta profundidades de 1 a 2 metros entre las calles Simón Bolívar y San Martin, sobre la Av. Bertolotto. Asimismo, se identifica la existencia de anomalías puntuales a lo largo de la línea debido a la presencia de buzones, tuberías, entre otros.

Línea GPR15-SM: Realizada en el borde del acantilado paralela a la Av. Bertolotto, con una longitud de 325 metros y orientada en dirección NO a SE. En esta línea se identifica la presencia de una capa de 2.5 metros de espesor conformado por materiales heterogéneos. Asimismo, se identifica la presencia de anomalías en forma de pliegues a lo largo del perfil debido a la presencia de grietas y desniveles del terreno hasta una profundidad de 1 metro entre el Jr. Sucre y el parque Media Luna, sobre la Av. Bertolotto. Asimismo, existen anomalías puntuales a lo largo de la sección asociada a la presencia de buzones, tuberías, entre otros.

Línea GPR16-SM: Realizada en el Jr. Sucre, con una longitud de 448 metros y orientada en dirección NE a SO, perpendicular al acantilado. En esta línea se identifica la existencia de una capa de 2.5 metros de espesor conformado por materiales heterogéneos. Asimismo, se identifica la presencia de anomalías puntuales en las cuatro primeras cuadras del Jr. Sucre asociadas a la presencia de tubería o buzones. Asimismo, la presencia de algunas fisuras o grietas superficiales dispersas que no sobrepasan el metro de profundidad.

Línea GPR17-SM: Realizada en el Centro Deportivo Rey Juan Carlos I, con una longitud de 14 metros y orientada en dirección SO a NE, perpendicular al acantilado. En esta línea se identifica la presencia de una capa de 1 metro de espesor conformado por materiales heterogéneos. Asimismo, se observa la existencia de grietas desde el inicio de la línea hasta los 6 metros de distancia con profundidades de hasta un metro, así como pliegues asociados a asentamientos del terreno a lo largo de toda la línea. En superficie se observa la presencia de grietas y fisuras.

Línea GPR18-SM: Realizada sobre la Av. Costanera, perpendicular a la calle Virú, límite con el distrito La Perla, con una longitud de 602 metros y orientada en dirección NO a SE. En esta línea se identifica la presencia de una capa de 2 metros de espesor conformado por suelos heterogéneos. Asimismo, se identifica la presencia de anomalías puntuales debido a la presencia de buzones, tuberías, gibas y zonas de alta deformación de suelos a la altura de la calle Virú y entre las calles Talambo y Lurifico.

Línea GPR19-SM: Realizada en la Av. Costanera, con una longitud de 448 metros y orientada en dirección NO a SE, paralela al acantilado. En esta línea se identifica la existencia de una capa de 1.5 metros de espesor conformado por suelos heterogéneos. Asimismo, se identifica la presencia de anomalías asociadas a alta deformación del suelo.

Línea GPR20-SM: Realizada en el Jr. Nicolás de Piérola, con una longitud de 286 metros y orientada en dirección SO a NE, perpendicular al acantilado. En esta línea se identifica la presencia de una capa de 1.5 metros de espesor conformado por suelos heterogéneos. Asimismo, se observa la existencia de anomalías puntuales debido a un cambio de tipos de suelo y desniveles.

b) Interpretación

Los radargramas obtenidos para el distrito de San Miguel permiten identificar la presencia, en el subsuelo, de 2 capas con espesores de 2 a 10 metros y en las cuales se identifica la existencia de anomalías asociadas a la presencia de grietas y asentamientos con las siguientes características:

- En el extremo norte del área de estudio, entre la calle Moche y la calle Gamarra, se identificó la presencia de reflectores lineales con amplitudes que se incrementan en zonas con existencia de asentamientos, grietas o fisuras en el suelo, que desde la superficie; alcanzan los 2 metros de profundidad en la zona del parque Echenique y Calle 19 (Maranguita).
- Hacia la zona central, entre la calle Gamarra hasta la calle Bolognesi, se observa la presencia de grietas que llegan hasta los 2 metros de profundidad (GPR08-SM), al igual que pliegues entrelazados en los primeros 4 metros y varias grietas que se observan en superficie, tal como ocurre en el parque Belén. Aquí las grietas, en superficie presenta aberturas de hasta 5 centímetros y profundidades entre 0.5 y 1.5 metros.
- En el extremo sur, entre la calle Bolognesi hasta la calle Diego Agüero (límite con el distrito de Magdalena), se identifica la existencia de pequeñas discontinuidades que se relacionaría con la presencia de fisuras a lo largo de la Av. Bertolotto hasta profundidades de 2.5 metros.

A lo largo del acantilado se identifica la presencia de anomalías puntuales asociadas a la existencia de estructuras del servicio de alcantarillado y buzones de agua, y otros que se asocian al cambio de material de asfalto a cemento (GPR16-SM).

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 solicitación 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

La adquisición de datos en campo se realizó durante los días 09, 10 y 11 de noviembre del 2020. Durante este periodo se recolectaron registros de vibración ambiental en 142 puntos utilizando sensores Lennartz y registradores CityShark II (Figura 26). Los puntos de adquisición de datos se distribuyen siguiendo 22 líneas perpendiculares al acantilado (perfiles) con longitudes del orden de 300 a 400 metros e intervalos de registro entre punto y punto de 40 a 50 metros (Figura 27). 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 26. Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensor Lennartz (2N) y registradores CityShark II.



Figura 27. Distribución espacial de los puntos de registros de vibración ambiental, en los ACV del distrito de San Miguel. Los perfiles, consideran puntos distribuidos siguiendo líneas perpendiculares al acantilado. Los códigos en gris, corresponden a puntos realizados en la zona baja del acantilado.

En la Figura 28, se muestra ejemplos de señales de vibración ambiental registrados en el punto ubicado en el cruce del Jr. Arica y Jr. Sucre. En estas señales se observa la presencia de ruido de poca amplitud y/o picos de amplitudes transitorias (SM18-01, suelos compactos), y otro en el parque Bertolotto sobre el acantilado con presencia de ruido de fondo continuo (SM18-06, suelos heterogéneos); y finalmente, otro ubicado en el circuito de playas con presencia de altos niveles de ruido (SM12-09, suelos muy heterogéneos y/o blandos). 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 del suelo ante la solicitación sísmica.

2.5.2.-Procesamiento y análisis

Para aplicar la técnica de cocientes espectrales H/V se considera 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 de las componentes horizontales 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 29.



Figura 28. Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Registros obtenidos en el cruce del Jr. Arica y Jr. Sucre con ruido transitorio (SM18-01); parque Bertolotto en el borde del acantilado con ruido constante (SM18-06) y en el Circuito de Playas con ruido permanente (SM18-09). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

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).



Figura 29. Resultados obtenidos con el método de razones espectrales (H/V) para el punto SM12-05. 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.

- 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.

2.5.3.- Resultados e interpretación

En los ACV del distrito de San Miguel, los suelos responden a dos rangos de frecuencias: Fo (F≤2.0 Hz) y F1 (F>2.0 Hz); y en general, su distribución espacial muestra que cerca del borde del acantilado prevalecen hasta tres picos de frecuencias bien definidos y conforme se avanza en dirección este (hacia el área urbana), aparece uno y dos picos de frecuencias con mínimas amplificaciones. Estas características sugieren que en las cercanías del acantilado los suelos son menos compactos y más heterogéneos.

- Frecuencias predominantes F0: En la Figura 30 se muestra el mapa de distribución espacial de los valores de Fo, y en él se observa el predominio de valores entre 0.8 a 1.8 Hz (0.6 - 1.2 segundos) representados por un pico de frecuencia. Estos valores de baja frecuencia estarían asociados a la presencia de estratos profundos de gran espesor presentes en toda la terraza aluvial del ACV.

- Frecuencias predominantes F1: En la Figura 31, se muestra la distribución espacial de los valores de F1, y en él se observa el predominio de valores entre 2.8 a 15 Hz (0.1 a 0.3 segundos). En general, para este rango de frecuencias las señales presentan amplificaciones mayores a 2 veces y dos picos de frecuencias, principalmente en las cercanías del acantilado y son debidos a la



Figura 30. Distribución espacial de las frecuencias F0 (F<2.0Hz). Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 2 veces.



Figura 31. Distribución espacial de las frecuencias F1 (F>2.0Hz). Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 2 veces.

presencia de suelos heterogéneos depositados sobre estratos compactos. En la zona que corresponde al circuito de playas, se identifica un pico de frecuencia bien definido entre 5 a 8 Hz; con amplificaciones de hasta 7 veces, lo cual sugiere la presencia de suelos blandos.

En la Figura 32 se muestra ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos SM02-04, SM08-03 y SM20-05 ubicados a 60, 70 y 80 metros del borde del acantilado, próximos a las calles Santa Rosa, Jorge Chávez y San Martín. En estos espectros sobresalen picos con frecuencias a 0.8 (SM02-04), 0.9 (SM08-03) y 1.0 (SM20-05) Hz con amplificaciones de 2.9, 2.1 y 1.8 veces respectivamente.

Asimismo, en esta misma figura se muestra ejemplos de razones espectrales para los puntos SM02-05, SM08-04 y SM20-07, ubicados próximos al borde del acantilado. En estos puntos resaltan la presencia de dos a más picos, el primero presenta frecuencias de 0.9, 1.4 y 1.18 Hz con amplificaciones de 3.7, 2.5 y 1.8 veces; el segundo presenta frecuencias de 2.8, 3.2 y 3.2 Hz con amplificaciones de 2.1, 1.9 y 1.6 veces respectivamente y el tercer pico, presenta frecuencias de 7.5, 10.5 y 14.7 Hz con amplificaciones de 1.8, 2.4 y 2 veces. Es notorio que los niveles de amplificación en los dos últimos picos aumentan considerablemente cerca del acantilado.

A fin de evaluar el comportamiento dinámico del suelo a lo largo del ACV del distrito de San Miguel, se analiza de manera conjunta la información contenida en cada gráfico de razones espectrales (H/V) para los 22 perfiles perpendiculares al acantilado. En la Figura 33a, se muestra los gráficos de razones espectrales correspondientes a puntos del perfil P-16 (Figura 27), siendo sus características las siguientes:







SM08-03



Figura 32. Ejemplos de razones espectrales (H/V): Puntos SM02-04, SM08-03 y SM20-05, ubicados a 70, 80 y 60 metros del borde del acantilado. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.





Figura 32. Continuación... Ejemplos de razones espectrales (H/V): Puntos SM02-05, SM08-04 y SM20-07, ubicados próximos al borde del acantilado. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

- En el punto SM16-02 ubicado a 100 metros del acantilado en dirección este, sobresalen dos picos de frecuencia, con mínimas amplificaciones.
- En el punto SM16-04 ubicado en el Complejo Deportivo Juan Joya Cordero, en la Av. Bertolotto, se observa la presencia de dos picos a frecuencias de 1.2 y 6.6 Hz con amplificaciones mayores a 2 veces.
- En el tercer punto, ubicado en la vía costanera, sobresalen dos picos de frecuencia bien definidos a 1.2 y a 5.3 Hz con amplificaciones de hasta 6.5 veces.

Asimismo, en la Figura 33b, se muestra los gráficos de razones espectrales correspondientes a puntos del perfil P-21, siendo sus características las siguientes:

- En el punto SM21-03 ubicado a 60 metros del acantilado en dirección este, no sobresale ningún pico de frecuencia.
- En el punto SM21-05 ubicado sobre el acantilado, al final de la calle Diego de Agüero, se observa el registro de tres picos a frecuencias de 1.2, 3.8 y 9.5 Hz con amplificaciones de 2.3, 2.0 y 2.4 veces respectivamente.
- En el tercer punto, ubicado en la vía costanera, sobresale dos picos de frecuencia bien definidos a 1.3 y 8.4 Hz con amplificaciones de hasta 3.5 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 borde 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 no compactos.



Figura 33. a) Razones espectrales obtenidas para puntos del perfil P-16 (SM16-02, SM16-04 y SM16-06), ubicados de Este a Oeste, a 100 metros del acantilado, a 5 metros y el tercero en el Circuito de Playas.



Figura 33. b) Razones espectrales obtenidas para puntos del perfil P-21 (SM21-03, SM21-05 y SM21-06), ubicados de Este a Oeste, a 60 metros del acantilado, a 2 metros y el tercero en el Circuito de Playas.

- Periodos Dominantes: Para presentar los resultados finales 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 34, 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 el acantilado del distrito de San Miguel responden principalmente a dos rangos de periodos: Próximos al acantilado, los suelos responden a más de dos picos con valores entre 0.1-0.8 segundos, evidenciando la presencia de suelos heterogéneos e inestables. A mayor distancia, en dirección Este, los suelos responden a un único periodo (0.6-1.0 segundos) con bajas amplificaciones y en muchos casos, no se identifica ningún periodo, evidenciando la presencia de suelos homogéneos y compactos.

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).



Figura 34. Distribución espacial de los valores de periodos dominantes del suelo para el distrito de San Miguel. Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 2 veces.

2.6.1.- Adquisición de datos

En el área de estudio, se recolectaron 23 datos gravimétricos distribuidos en 2 líneas con longitudes de 428 y 454 metros; ambas orientadas de manera perpendiculares al acantilado del distrito de San Miguel (Figura 35). La distancia entre cada punto de medición fue de 50 metros en promedio. Los valores de gravedad se registraron con un gravímetro LaCoste & Romberg con una precisión ± 0,01 mGal, ver Figura 36. Asimismo, con la finalidad de contar con coordenadas precisas de los puntos de medición se realizaron mediciones GNSS en modo estático en cada punto gravimétrico. Para realizar las correcciones, se considera como punto de gravedad absoluta la obtenida en la estación SAMI (978285.488 mGal), ubicada en el distrito de San Miguel (273478.1432 E, 8663109.829N y 56.75 metros de elevación).

2.6.2.- Procesamiento y análisis

Para conocer los valores de anomalías de Bouguer corregida, los datos recolectados en campo fueron corregidos por latitud, marea, topografía, aire libre y por Bouguer (Kane, 1962; Nagy, 1966). Para este objetivo se utilizó el software Oasis Montaj de Geosoft y un valor de densidad media para las rocas de 2.67 g/cm³ (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.



Figura 35. Distribución espacial de los puntos gravimétricos tomados en los acantilados del distrito de San Miguel.



Figura 36. Estación gravimétrica base SAMI ubicada en el distrito de San Miguel.

2.6.3.- Resultados e interpretación

a) Resultados

En los perfiles gravimétricos, los valores de anomalías residuales varían de -0.3 a 0.3 mGal (Figura 37), centrándose los valores bajos en el borde del acantilado, cerca del parque Belén (Perfil SM01) y del parque Bertolotto (Perfil SM02) y que estarían asociados a la presencia de capas de gran espesor compuestas por material heterogéneo. Los valores altos (0.2 a 0.3 mGal) están presentes en la parte baja del acantilado, alrededor de las zonas domos de la Costa Verde, circuito de playas, Jr. Federico Gallese (Perfil SM01) y la Av. La Libertad (Perfil SM02).

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 (SM01 y SM02) haciendo uso del módulo GM-SYS del software Oasis Montaj (Figura 38).



Figura 37. Mapa de anomalía residual de Bouguer, Los perfiles A-A' y B-B' corresponden a los perfiles SM01 y SM02, que cruzan el parque Belén y Bertolotto, respectivamente.

Perfil gravimétrico SM01: En la Figura 38 se observa que las variaciones de las anomalías residuales reflejan cambios en la densidad de los materiales del subsuelo en profundidad (puntos negros). El perfil obtenido define la existencia de tres capas de suelos:

- La primera capa de baja densidad (1.6 gr/cm³) y espesores que varían desde 4 metros próximo al acantilado hasta 6 metros hacia el extremo NE (próximo a la Av. La Paz).
- La segunda capa con una densidad de 1.9 gr/cm³ y espesores de 7 a 18 metros.

 La tercera capa con una densidad de 2.2 gr/cm³ y espesores de hasta 15 metros.

Por último, el perfil sugiere que a mayor profundidad y con espesor indeterminado, existe una capa con suelos más densos (2.5 gr/cm³) compuestos por material gravoso.



Figura 38. Perfil gravimétrico SM01, orientada de 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 SM02: En la Figura 39 se observa que las variaciones de las anomalías residuales 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 presenta una densidad de 1.6 gr/cm³ con espesores que varían de 2 a 7 metros.
- La segunda capa presenta una densidad de 1.9 gr/cm³, y espesores que varían de 5 a 10 metros, siendo mayor en el parque Bertolotto y menor hacia la calle. San Martín.
- La tercera capa tiene una densidad de 2.2 gr/cm³ y espesores de hasta 8 metros.

Finalmente, el perfil sugiere la presencia de una capa de espesor indeterminable con valores de densidad mayores a 2.5 gr/cm³.



Figura 39. Sección gravimétrica SM02, orientada de 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.

b) Interpretación

Los resultados obtenidos del análisis realizado sobre los perfiles gravimétricos SM01 y SM02, fueron correlacionados con la información obtenida de los estudios de refracción sísmica, MASW, tomografía eléctrica y HV. En los ACV del distrito de San Miguel, se ha identificado la existencia en el subsuelo de tres capas con espesores bien definidos y valores de densidad que se incrementan gradualmente de 1.6 a 2.2 gr/cm³:

- La primera capa presenta espesores que varían entre 2 y 10 metros.
 Esta capa estaría compuesta por materiales heterogéneos y/o rellenos poco consolidados
- La segunda capa con espesores de 5 a 18 m, y la tercera con espesores de 3 a 15 metros, estarían constituidos por gravas y conglomerados consolidados que incrementan su densidad con la profundidad.

3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUBSUELO Y SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO

La exploración de la estructura y caracterización física del subsuelo de los ACV del distrito de San Miguel fue realizada usando datos e información generada usando 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 Miguel, se asienta sobre una terraza conformada por depósitos aluviales y cuyo cambio topográfico más resaltante lo conforman los Acantilados de la Costa Verde. Para conocer sus características físicas se ha recolectado datos geofísicos en la parte alta del acantilado (velocidades de ondas longitudinales -Vp, perfiles unidimensionales de ondas de corte - Vs, secciones geoeléctricas y curvas de razones espectrales) considerando tendidos lineales que han sido ubicadas estratégicamente para conocer los espesores y densidades de los diferentes materiales que conforman el subsuelo hasta una profundidad de aproximadamente 60 metros.

En base a los resultados obtenidos, los ACV del distrito de San Miguel han sido divididos en 3 sectores debido a que presentan características físicas similares, las mismas que se describen a continuación:

Extremo Norte

Entre el Jr. Rufino Echenique y la calle Maranga (Figura 40), se ha identificado en el subsuelo la presencia de 3 capas:

 La primera, está constituida por materiales aluviales sueltos a medianamente compactos (Vs =266 m/s; Vp =500 m/s) con espesores hasta 4 metros. Estos suelos presentan diferentes



Figura 40. 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 Miguel (Jr. Rufino Echenique). En la tabla de velocidades, se resalta con una elipse la capa de baja velocidad (Vs)

contenidos de humedad, que disminuyen notablemente hacia la zona de pendiente, lo cual indica la presencia de suelos heterogéneos compuestos por material alóctono y/o rellenos con predominio de grietas.

- La segunda capa está constituida por material heterogéneo y aluvial medianamente compacto (Vs=330 m/s; Vp= 710 m/s) con espesores hasta 19 metros. Estos suelos presentan de moderado a alto contenido de humedad.
- La tercera capa está compuesta por materiales compactos (Vs=541 m/s; Vp = 1300 m/s) y con espesores de 24 metros. Estos suelos están conformados por gravas con moderado contenido de humedad.

En este sector y a nivel superficial, se identifica la presencia de grietas paralelas al acantilado asociados a asentamientos del suelo a lo largo de 8 metros de longitud y profundidades de hasta 1.5 metros. Esta morfología del terreno muestra la heterogeneidad de los suelos en profundidad, principalmente cerca del borde del acantilado y a mayor distancia, hacia el área urbana, los suelos se muestran más compactos y como parte de una capa de gran espesor.

Zona Central

Entre la calle Cmdt. L. Espinar y parque Belén (Figura 41), se ha identificado la presencia en el subsuelo de 3 capas con las siguientes características:

 La primera capa está constituida por material heterogéneo y/o rellenos (Vs =255 m/s; Vp =450 m/s) con espesores de hasta 5 metros. Estos suelos presentan diferentes contenidos de humedad.



Figura 41. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos de tomografía eléctrica, refracción sísmica, MASW-MAM y georadar, para la zona central del distrito de San Miguel (calle Cmdt. L. Espinar y parque Belén).

- La segunda capa está constituida por material heterogéneo de moderada compactación (Vs=412 m/s; Vp=609 m/s) con espesores de hasta 20 m. Estos suelos presentan moderado contenido de humedad y están compuestos por gravas y finos de mediana compacidad.
- La tercera capa de 30 metros de espesor, está constituida por un estrato de alta compacidad (Vs=600 m/s; Vp = 1490 m/s) y conformado por gravas, con moderado contenido de humedad. A mayor profundidad, el incremento en la velocidad de las ondas de corte (Vs de 600 a 750 m/s) indica la presencia de suelos húmedos en una capa de 27 metros de espesor.

En este sector, se identificado la presencia de grietas a lo largo de las cuales se han producido asentamiento de los suelos paralelos al acantilado hasta profundidades de 2.0 y 3.0 metros. Estos escenarios indican la presencia de suelos con alta heterogeneidad y poco compactos. A mayor distancia, hacia el área urbana, los suelos son compactos y están compuestos por material aluvial gravoso con alta rigidez.

Extremo Sur

Entre el Jr. Sucre y parque Bertolotto (Figura 42), se ha identificado en el subsuelo la presencia de 3 capas con las siguientes características:

 La primera capa está conformada por material aluvial sueltos a medianamente compactos (Vs =266 m/s; Vp =430 m/s) con espesores de hasta 4 metros. Estos suelos presentan diferentes niveles de humedad, que se incrementan hacia el parque Bertolotto (extremo NO) y disminuyen hacia la calle San Martín (extremo SO).



Figura 42. 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 Miguel (Jr. Sucre y parque Bertolotto).

- La segunda capa está constituida por materiales aluvial medianamente compacto (Vs=395 m/s; Vp=730 m/s) y con espesores de hasta 9 m. Estos suelos presentan moderado contenido de humedad.
- La tercera capa de 27 metros de espesor corresponde a un estrato muy compacto (Vs=537 m/s; Vp =1407 m/s), debido a que está conformado por gravas, con moderado contenido de humedad. A mayor profundidad se observa el incremento en la velocidad de las ondas de corte (Vs de 700 a 850 m/s) y la presencia de una capa de suelos húmedos con espesores de 21 metros.

En este sector y a niveles superficiales, se identifica la presencia de grietas a lo largo de las cuales se han producido asentamientos próximos al acantilado hasta profundidades de 2 metros. Estas características del suelo muestran su alta heterogeneidad en su composición.

En general, en el distrito de San Miguel, en dirección perpendicular al borde del acantilado, se ha identificado que los suelos presentan dos capas con similar composición y comportamiento dinámico, y en conjunto sus características son (Figura 43):

- A 10 metros del acantilado, la capa de material heterogéneo presenta un espesor promedio de 18 a 25 metros por el parque Belén; de 25 metros por el Jr. Rufino Echenique y la calle Maranga; y de 15 metros por el parque Bertolotto.
- A 100 metros, la capa de material heterogéneo presenta un espesor de 25 metros a la altura del parque Belén, al igual que en el Jr. Rufino

Echenique, de 15 metros a la altura del parque Belén; mientras que, a la altura del parque Bertolotto, la capa de suelos presenta un espesor de 8 metros.



Figura 43. 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, RS02 y RS03).

De acuerdo a lo indicado, en el extremo norte la primera capa o estrato de suelos se mantiene constante, desde el acantilado hasta una distancia de 100 metros hacia el área urbana con un espesor de 25 metros; mientras que en el extremo sur, el espesor disminuye pasando de 15 a 8 metros, lo cual evidencia que los suelos son más estables hacia el extremo SE del área de estudio. Analizando imágenes frontales del acantilado (a pesar de estar cubierto con mallas) y su correlación con los resultados obtenidos con los métodos sísmicos y de eléctrica, se distingue las dos capas superficiales con las siguientes características (Figura 44):

- A la altura del Jr. Rufino Echenique (próximo al límite del distrito de San Miguel y La Perla), se observa la presencia de un estrato de material heterogéneo de 25 metros de espesor con el predominio de finos, coherente con las dos primeras capas identificados con los métodos sísmicos (Vs<500m/s). Este material heterogéneo presenta moderado contenido de humedad hasta los 30 metros de profundidad, para luego incrementarse hasta niveles altos (Figura 44a).
- A la altura del parque Belén, se identifica la presencia de una capa superficial de material heterogéneo (rellenos), emplazada sobre capas de grava y material fino. Según los resultados obtenidos con los métodos sísmicos, en las dos primeras capas predominan materiales medianamente compactos con un espesor promedio de 25 metros, para luego disminuir conforme se tiene hacia su extremo norte (18 metros). A la altura de la calle Independencia (extremo sur), se evidencia la presencia de una quebrada rellenada con materiales que han provocado en superficie el desarrollo de asentamientos y formación de grietas. A nivel superficial, este material heterogéneo no muestra humedad (Figura 44b).
- A la altura del parque Bertolotto, se identifica la presencia de una capa superficial compuesta por material heterogéneo (clastos sueltos), emplazada sobre capas de grava con mayor contenido de finos (arena y limos). Estas características permite tener materiales de mayor consistencia hasta los 13 metros de profundidad (Vs<500m/s). En el Malecón Castagnola (límite con el distrito de Magdalena del mar), el

acantilado esta descubierto pudiéndose identificar claramente que las capas son similares a las que se presentan en el parque Bertolotto. A nivel superficial, este material presenta moderado contenido de humedad que se incrementa en dirección sur. Hacia la zona central (zona de bajada a la playa), no se observa la presencia de humedad (Figura 44c).

En la zona de playa se identifica la presencia de una capa superficial compuesta por material de relleno (clastos sueltos) emplazada sobre materiales con moderada consistencia hasta los 20 metros de profundidad (Vs<500m/s). A nivel superficial, este material presenta moderado contenido de humedad hasta una profundidad de 10 metros y por debajo, el material presenta alto contenido de humedad por su proximidad al mar. Asimismo, según las razones espectrales los suelos responden a 0.2 segundos con amplificaciones máximas relativas de hasta 7 veces, evidenciando que son poco compactos (Figura 44d).

Estas interpretaciones se correlacionan con los resultados obtenidos a partir de las razones espectrales para puntos ubicados sobre estos estratos. Picos con frecuencias F>10Hz para el primer estrato de poco espesor; frecuencias altas F=3.3 Hz para el segundo estrado de mediano espesor y el estrado de mayor espesor con frecuencias de F<2.0 Hz.

En conclusión, en el distrito de San Miguel, a nivel superficial, los suelos presentan poca compactación y densidad por estar constituidos por materiales heterogéneos y de rellenos; mientras que, a mayor profundidad las capas del subsuelo presentan mayor consistencia y densidad por estar constituidos por gravas y conglomerados consolidados. Asimismo, entre el parque Belén y el Jr. Rufino Echenique se ha identificado la presencia de estratos permeables con alto contenido de humedad a diferentes niveles de profundidad, debido a la presencia de materiales finos como limos o arcilla de mayor permeabilidad.


Figura 44. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos sísmico y eléctrico, con la cara expuesta del ACV, a la altura del Jr. Rufino Echenique (a).



Figura 44. ...Continuación.../. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos sísmico y eléctrico, con la cara expuesta del ACV, a la altura del parque Belén (b).



Figura 44. ...Continuación.../. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos sísmico y eléctrico, con la cara expuesta del ACV, a la altura del parque Bertolotto (c).



Figura 44. ...Continuación.../. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos sísmico y eléctrico, en la zona de playa (d).

En la zona del parque Belén se ha identificado la existencia de grietas con profundidades de hasta 2 metros, al igual que en la Calle 19; mientras que, en la calle Miramar, las grietas que acompañan a suelos en hundimiento llegan hasta los 1.5 metros de profundidad (Figura 45).



Figura 45. Imágenes de las grietas observadas en pistas y acera en el distrito de San Miguel. Asentamiento diferencial de 5 cm entre la acera de concreto y la acera de bloquetas.



Figura 45. ... Continuación../. Imágenes de grietas observadas en pistas y veredas en el distrito de San Miguel. Grietas en la ciclovía del Balneario Costanera-San Miguel, a) En el año 2016 las grietas presentaban abertura de 0.40 m, b) Año 2020, aunque se reconstruyó la ciclovía, las grietas se forman rápidamente y persisten en el tiempo.



Figura 45. ... Continuación../. Imágenes de las grietas observadas en veredas y terraplenes en el distrito de San Miguel. Agrietamientos en el terreno que afectan infraestructuras a) Parque recreacional malecón Costanera y b) Centro Deportivo Juvenil Rey Juan Carlos I.

3.2. Zonas de quebradas

Haciendo uso de fotografías áreas del año 1946, en los acantilados del distrito de San Miguel se ha identificado la presencia de áreas que inicialmente fueron cárcavas o quebradas y con el tiempo fueron rellenadas con la finalidad de aprovechar el espacio. En algunos casos, estas áreas fueron destinadas a parques, jardines y áreas deportivas, pero en su mayoría para la construcción de edificaciones. En el distrito de San Miguel, estas áreas fueron dedicadas a la construcción de áreas verdes y estructuras familiares. Además, existen extensas áreas de terreno ganadas al mar que fueron destinadas principalmente a malecones.

Para un mejor análisis e interpretación, a las áreas de rellenos se les denominada como Quebrada Q1 hasta Q5, y en ellas se han realizado líneas de RS adicionales a fin de lograr caracterizarlas en profundidad y expansión.

Quebrada Q1: Ubicada en la Calle 19 y la Av. Costanera. Aquí se ha realizado 2 líneas de RS adicionales y distribuidas según la Figura 46. Hacia el extremo Noroeste, la línea ubicada sobre el parque de la Virgen de la Inmaculada Concepción y la Ca. 19 (sección A), las capas de suelo superficial presentan espesores de hasta 6 metros y conforme se avanza en dirección a Maranguita (sección B), el espesor de la capa superficial disminuye hasta los 2 metros. Así mismo, en la línea ubicada sobre terreno ganado al mar (sección C), la capa superficial presenta

Quebrada Q2: Ubicada en el estadio Magallanes. Aquí se ha realizado 2 líneas de RS adicionales y distribuidas según la Figura 47. En la sección D, la capa superficial presenta espesores de hasta 5 metros al centro de la línea frente a la calle Bernardo Alcedo, para luego reducir su espesor hacia los extremos. En la sección E, la capa superficial presenta espesores menores a 3 metros debido probablemente al tratamiento del suelo para la construcción del estadio, Esta línea se encuentra sobre la mayor área de la quebrada y/o cárcava.

Quebrada Q1



Figura 46. Análisis de los resultados obtenidos en la Calle 19 y Av. Costanera.

Quebrada Q3: Ubicada en el jirón Nicolás de Piérola. Aquí se ha realizado 2 líneas de RS adicionales y distribuidas según la Figura 48. Hacia el extremo Noreste de la línea ubicada sobre el jirón Nicolás de Piérola (sección F), la capa superficial de suelo presenta espesores de hasta 3 metros, para luego al inicio de la bifurcación del jirón y conforme se avanza en dirección noreste, el espesor disminuye. La sección G muestra para la capa superficial mayores espesores al centro de la línea y que se reduce hacia los extremos.





Figura 47. Análisis de los resultados obtenidos en el estadio Magallanes.



Figura 48. Análisis de los resultados obtenidos entre el parque Federico Villareal y la Ca. Ramón Castilla.

Quebrada Q4: Ubicada en el jirón Ladislao Espinar. Aquí se ha realizado 2 líneas de RS adicionales y distribuidas según la Figura 49. En la sección H, se muestra que la capa superficial de suelo presenta espesores de hasta 10 metros, próximos al borde del acantilado y conforme se avanza en dirección noreste, el espesor disminuye. La sección J, paralelo a la Av. Costanera, muestra que la capa superficial presenta mayores espesores al centro de la línea, para reducirse hacia los extremos.



Figura 49. Análisis de los resultados obtenidos en el jirón Cmdt. Espinar y la Av. Costanera.

Quebrada Q5: Ubicada en la calle Independencia y la Av. Bertolotto. Aquí se ha realizado 3 líneas de RS adicionales y distribuidas según la Figura 50. En la sección L, ubicada hacia el norte en la calle Federico Gallese se observa que la capa superficial de suelo presenta espesores de 4 metros y conforme se avanza hacia el acantilado estos espesores se incrementan hasta 7 metros (sección M y N).



Figura 50. Análisis de los resultados obtenidos entre la calle Independencia y la Av. Bertolloto.

3.3. Delimitación de zonas de mayor riesgo por sismo

La aplicación de métodos geofísicos para evaluar el comportamiento dinámico de los suelos en los ACV, 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 Costanera. Para el distrito de San Miguel, el análisis de los resultados se realiza de manera sectorizada de acuerdo a la Figura 51:

Sector A - SM: Considera el área del acantilado, entre la calle Virú (extremo norte) y la calle Jorge Chávez. En este sector el límite que separa, en superficie, los suelos con diferente comportamiento dinámico, se encuentra a 220 metros del acantilado, para disminuir progresivamente hasta los 190 metros hacia su extremo sur, hasta la calle Gamarra.



Figura 51. Delimitación de la zona con alto peligro por sismos, en la parte superior del Acantilado de la Costa Verde en el distrito de San Miguel. Los Sectores A-SM, B-SM y C-SM, comprenden áreas cuyos suelos presentan similares características físicas y dinámicas.

En este sector los suelos presentan alto contenido de humedad debido a la presencia de áreas verdes y cuyos sistemas de regadío ocasionan problemas geotécnicos (grietas, asentamientos), como los observados en el parque Belén y en las inmediaciones de la comisaría de San Miguel. Hacia la bajada al circuito de playas, el contenido de humedad disminuye considerablemente.

Sector C - SM: Considera el área del acantilado, entre la calle Bolognesi (extremo norte) y la calle Diego Agüero. En este sector el límite en superficie que separa, los suelos con diferente comportamiento dinámico, se encuentra a 100 metros de distancia del acantilado, el mismo que disminuye progresivamente a 60 metros hacia su extremo sur.

CONCLUSIONES

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

- A lo largo del acantilado, se define la existencia de tres capas sísmicas:
 - La primera, con velocidades Vp =350 a 500 m/s y Vs=234 a 266 m/s, y espesores de 4 a 8 metros. Los suelos corresponden a aluviales sueltos a medianamente compactos (densidad de 0.16 gr/cm³).
 - La segunda capa, con velocidades Vp=502 a 1110 m/s y Vs=330 a 417 m/s, y espesores de 8 a 30 metros. Estos suelos están compuestos de material aluvial medianamente compacto (1.9 gr/cm³).
 - La tercera capa, con velocidades Vp > 1110 m/s y de corte Vs=537 a 700 m/s y espesores que superan los 18 metros. Estos suelos están compuestos por material aluvial consolidado (2.2 gr/cm³).
 - A mayor profundidad, la velocidad de las ondas Vs supera los 700 m/s, indicando la presencia de suelos compactos compuestos por gravas.

•Se ha observado que la capa compuesta por suelos poco a modernamente consolidados, presenta espesores de 25 metros constantes desde el borde del acantilado hasta una distancia de 100 metros hacia el área urbana; sin embargo, en su extremo sur, los espesores disminuyen de 15 a 8 metros. Este escenario, permite considerar que los suelos hacia el extremo sur evidencien mayor consistencia respecto a su extremo norte.

•En el límite del acantilado, entre el Jr. Rufino Echenique con la Av. Costanera, (extremo norte), se ha identificado la presencia de dos horizontes geoeléctrico, uno con moderado contenido de humedad y espesor de 25 metros que se encuentra sobre otro horizonte con alto contenido de humedad de 35 metros de espesor. Entre el parque Belén y la proyección. la calle Cmdt. L. Espinar (zona central), se han identificado la presencia de horizontes con moderado a bajo contenido de humedad con un espesor de hasta 40 metros. Hacia la Av. Bertolotto (extremo sur) se ha identificado la existencia de un horizonte geoeléctrico de 15 metros de espesor con moderado contenido de humedad. A mayor profundidad los suelos no muestran humedad. El alto grado de humedad presente en las capas superficiales se debe a la presencia de grandes áreas verdes que son regadas continuamente, y que en el tiempo genera problemas geotécnicos como la formación de asentamientos de terreno y la formación de grietas en el suelo, tal como ocurre en el parque Belén y en las inmediaciones de la comisaría de San Miguel

•De acuerdo a los resultados obtenidos con el georadar, las áreas afectadas por asentamientos alcanzan profundidades de hasta 3 metros y grietas hasta profundidades de 2 metros, principalmente en los parques Bertolotto y Belén. Asimismo, en la calle Miramar se han identificado la presencia de grietas con hundimientos del terreno que llegan hasta profundidades de 1.5 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 Miguel, el límite que separa los suelos estables de los inestables y cuyo comportamiento dinámico representa un alto riesgo ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud, se encuentra demarcado por la Av. Costanera al noroeste y la Av. Bertolotto al sureste. Este límite se encuentra a distancias que varían entre 220 a 70 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: sector Echenique, el cruce de la Av. Costanera con la calle Cmdt. L. Espinar (próximo al hogar Hermelinda Carrera), el parque Belén a la altura de la calle Miramar y la calle Los Lirios (por la comisaría del distrito), el Complejo Deportivo Municipal Juan Joya Cordero y el límite con el distrito de Magdalena del Mar al final de la calle Diego de Agüero.

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM D6432-11. Standard Guide for using the Surface ground Penetrating Radar Method for Subsurface, Investigation. <u>https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/astm</u>.
- CISMID (2015). Estudio de microzonificación sísmica y el análisis del riesgo en la zona de estudio ubicada en el distrito de San Miguel.
- Díaz, J. (2008). Estabilización del talud de la Costa Verde en la zona del distrito de Magdalena. Tesis de grado PUCP.
- 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 Acantilados 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.
- Pueyo. (2016). Ground penetrating radar evaluation of the internal structure of fluvial tufa deposits (Devanos-A navieja system, NE Spain). Geophysical Journal International. 564-566 pp.

- 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 (2004). 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.
- Telford W.M, GeldartL.P. and Sheriff R.E. (1990). Applied Geophisic. 2^a 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.













































ANEXO III

Tablas con parámetros sísmicos

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	266	458	4
2	330	710	19
3	541	1363	24
4	479	1594	18
Semi- espacio	604	1761	-

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

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

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	234	454	4
2	331	623	14
3	655	1154	26
4	493	1570	14
Semi- espacio	746	1648	-

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

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	283	571	7
2	386	1091	13
3	553	1707	17
Semi- espacio	660	2173	-

Valores de Vs, V<u>p y espesor para la línea sísmica LS04-SM</u>.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	214	529	5
2	430	980	29
3	596	1568	16
Semi-	711	1789	_
espacio	,	1707	

Valores de Vs, V<u>p y espesor para la línea sísmica LS05-SM.</u>

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	255	450	5
2	417	609	20
3	600	1489	32
Semi- espacio	741	1869	-

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	242	432	5
2	387	980	15
3	645	1889	14
4	797	2438	24
Semi- espacio	665	2557	-

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

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS07-SM.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor
			(111)
1	202	440	5
2	422	1079	27
3	572	1872	19
Semi-	696	2221	
espacio	080		-

Valores de Vs, V<u>p y espesor para la línea sísmica LS08-SM.</u>

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	343	711	5
2	551	1350	8
3	485	1748	5
Semi- espacio	669	1931	-

Valores de Vs, V<u>p y espesor para la línea sísmica LS09-SM.</u>

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	266	430	4
2	395	728	9
3	537	1407	27
4	745	2019	21
Semi- espacio	864	2447	-

Valores de Vs, V<u>p y espesor para la línea sísmica LS10-SM</u>.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	283	604	9
2	677	1973	11
З	1035	3000	17
Semi- espacio	1259	3367	-

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	210	483	4
2	311	922	7
3	436	1326	17
Semi- espacio	613	1300	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS11-SM.

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS12-SM.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	219	432	5
2	337	823	10
3	428	1082	13
Semi- espacio	490	908	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS13-SM.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	235	427	3
2	327	948	12
Semi- espacio	414	1429	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS14-SM.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	303	489	5
2	440	931	32
Semi- espacio	611	1841	-

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	285	606	5
2	429	989	23
3	610	1363	15
Semi- espacio	771	1821	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS15-SM.

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS16-SM.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	252	425	4
2	431	784	24
3	607	1100	33
Semi- espacio	695	1407	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS17-SM.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	237	387	7
2	434	763	18
3	581	1104	25
Semi- espacio	708	1480	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS18-SM.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	250	450	7
2	377	664	18
3	651	912	25
Semi- espacio	784	1420	-

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	223	406	9
2	342	841	11
Semi- espacio	494	1171	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS19-SM.

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS20-SM.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	246	330	9
2	417	603	19
3	783	933	19
Semi- espacio	1025	1171	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS21-SM.

	V_{c} (m/c)	\sqrt{n} (m/s)	Espesor
Сара н	vs (11/s)	•p (m/s)	(m)
1	240	458	5
2	417	753	8
3	566	1008	21
4	695	1207	20
Semi-	904	2955	
espacio	704	2655	-

Valores de Vs, Vp y espesor para la línea sísmica LS22-SM.

Capa N°	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	200	342	4
2	274	475	7
3	362	907	26
Semi- espacio	543	1535	-

ANEXO IV

Secciones geoeléctricas
























ANEXO V

Secciones de Radargramas









































