

Determinación de los niveles de cimentación en roca para la ampliación del Centro Comercial Cañaveral a partir de ensayos geofísicos y su correlación con exploración directa

Determination of rock foundation levels for the expansion of the Cañaveral - Colombia shopping center, based on geophysical tests and their correlation with direct exploration

Msc. Carlos Andrés Buenahora-Ballesteros¹, Ing. Fabián Castellanos-Prada², PhD. Antonio Miguel Martínez-Graña³

¹ E.D Ingeotecnia S.A.S, Colombia, Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-9497-9185>, Email: director@ingeotecnia.com.co

² E.D Ingeotecnia S.A.S, Colombia, Correo, Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-6774-8568>, Email: fcastellanos@ingeotecnia.com.co

³ Universidad de Salamanca, España, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2242-5192>, Email: amgranna@usal.es

Cómo citar: C.A. Buenahora-Ballesteros, F. Castellanos-Prada y A.M. Martínez-Graña, "Determinación de los niveles de cimentación en roca para la ampliación del Centro Comercial Cañaveral a partir de ensayos geofísicos y correlación con exploración directa", *Rev. Ingenio*, vol. 22, n°1, pp.16-23, 2025, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.4702>

Fecha de recibido: 31 de julio de 2023
Fecha de aprobación: 03 de noviembre de 2023

RESUMEN

Palabras clave:

Exploración geotécnica,
geofísica, MASW 2D,
Refracción.

El centro comercial cañaveral se localiza sobre depósitos aluviales recientes de baja consistencia, soportados sobre roca sedimentaria, la cual se encuentra a profundidades que cambian abruptamente, influenciado por la presencia de un lineamiento de una falla geológica. Teniendo en cuenta las cargas de gran magnitud, se hace necesaria la construcción de cimientos profundos para llegar hasta la roca. Sin embargo, realizar múltiples sondeos representaba un costo muy alto. Por lo anterior, se planteó una alternativa de determinar los niveles de la roca mediante ensayos de geofísica. Durante la fase de ejecución de los ensayos geofísicos, se presentaron dificultades por el nivel de ruido ambiental y la obtención de los registros de las ondas, dada la variabilidad de los niveles de roca e incluso el efecto que en algunos sectores del área de estudio la roca se encuentra muy superficial. Como conclusión se logró identificar las fortalezas y debilidades de cada uno de los métodos y generar un mapa 3D de las profundidades de los niveles de roca, insumo que sirvió para el diseño y presupuesto de los cimientos, los cuales fueron verificados mediante supervisión constante durante la construcción determinando los porcentajes de error.

ABSTRACT

Keywords:

Geotechnical
Exploration,
Geophysics, MASW
2D, Refraction.

The Cañaveral shopping center is located by recent alluvial deposits of low consistency, supported on sedimentary rock, influenced by the presence of a geological fault. Considering that the loads on the foundation are of great magnitude, it is necessary to build deep caisson foundations to reach the rock. However, performing a borehole on each one of them represented a very high cost and long execution times. Therefore, an alternative was proposed to determine the depth levels of the rock through different geophysical tests and try to calibrate the results through the correlation of some boreholes. During the execution and data processing phase of the geophysical tests, difficulties were encountered due to the level of environmental noise and the obtaining of the wave records, given the variability of the rock levels and even the effect that in some sectors of the study area the rock is very sub-surface. In conclusion, it was possible to identify the strengths and weaknesses of each of the exploration methods and generate a 3D map of the depths of the rock levels that served as input for the design and budget of the foundations, which were verified by constant supervision during construction to determine the error percentages.

1. Introducción

Desde tiempos remotos, la comprensión de las propiedades del suelo ha sido fundamental para el éxito de numerosos proyectos de construcción e ingeniería, es por esta razón que, a lo largo de la historia, la caracterización del suelo junto con la determinación del perfil estratigráfico ha sido un objetivo constante de estudio en el ámbito geotécnico. La variabilidad de suelos ha estado presente en múltiples proyectos a lo

largo del mundo, lo cual se ha podido verificar con varios incidentes producto de una pobre exploración geotécnica, sobre todo en proyectos en los que las solicitaciones de carga son muy grandes o en zonas en las que los suelos pueden llegar a tener un carácter especial por la sismicidad o por los antecedentes geológicos de la zona [1], ahora bien, teniendo en cuenta que la expansión tecnológica avanza de manera acelerada buscando facilitar la vida a las personas [2], la

Corresponding Author

Email: director@ingeotecnia.com.co (Carlos Andrés Buenahora Ballesteros)

Peer review comes under the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
This Article is licensed under CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>)



geofísica ha surgido como una herramienta esencial para esta tarea ya que permite explorar el suelo en profundidad con apenas afectación del entorno.

Usualmente cuando se realiza una exploración geotécnica se busca obtener la mayor cantidad de información posible. Sin embargo, muchas veces obtener esta información puede resultar costoso e inclusive inviable como, por ejemplo, el caso de una gran estructura con altas cargas en cada uno de sus apoyos. Si bien podría pensarse en ejecutar un sondeo mecánico por cada apoyo, pero desde el punto de vista económico resultaría demasiado costoso y aumentaría los tiempos de ejecución de las obras. Estas actividades podrían incluso llegar a afectar o molestar a terceros producto del polvo y ruido generado al perforar, más aún en entornos urbanos. Un caso similar se presentó en el centro comercial Cañaveral, en donde se planteaba la expansión de sus instalaciones mediante la construcción de una nueva edificación en el costado sur. Sin embargo, el sector en donde se planteaba la construcción se caracterizaba por estar en una zona ampliamente urbanizada y con diversidad de locales comerciales.

El suelo fundación se encuentra conformado por depósitos aluviales recientes de baja consistencia, lo que podría generar un gran inconveniente a futuro teniendo en cuenta las altas cargas que presentan normalmente los centros comerciales, además, el suelo del sector se caracteriza por presentar baja capacidad y cuando el terreno superficial es de mala calidad, es decir, de baja resistencia al esfuerzo cortante y/o muy compresible, existen varias alternativas de solución, incluyendo evitar o sustituir los suelos superficiales de mala calidad, apoyar la estructura en una cimentación profunda sobre estratos de buena calidad o cambiar el proyecto de localización [3], según lo anterior y teniendo en cuenta un análisis de costos realizado por el constructor, se consideró como mejor alternativa cimentar a una mayor profundidad hasta llegar a un estrato de roca competente.

El suelo medianamente competente se encontraba normalmente a más de 6.0 metros de profundidad, con lo cual, el uso de una cimentación superficial resultaba inviable, así que se propuso una cimentación profunda mediante la construcción de caissons soportados sobre roca. No obstante, debido a que las formaciones de rocas sedimentarias como Girón, presentan diferentes tipos de inclinaciones y pliegues producto de la tectónica, hace que los espesores de la roca varíen en profundidad y sean difíciles de identificar mediante técnicas convencionales de exploración como los sondeos mecánicos, por ende, se decidió complementar los resultados obtenidos con ensayos geofísicos que permitieran determinar la profundidad de la roca a lo largo de todo el sector de interés generando la menor afectación posible.

2. Área de estudio

La investigación tuvo como área de interés un sector específico del centro comercial Cañaveral, el cual se encuentra localizado en el municipio de Floridablanca en el departamento de Santander-Colombia. Regionalmente esta zona se encuentra en límites de las regiones geológicas del Macizo de Santander y la depresión tectónica de Bucaramanga, y por tanto en zona de influencia del sistema de fallas de Bucaramanga – Santa Marta, sistema de Fallas del Suárez y Río de Oro. Su ubicación geográfica es muy cercana al nido sísmico de Bucaramanga ubicando esta zona con influencia sísmica y posible desarrollo de fenómenos naturales relacionados a eventos de este tipo. Sobre estas formaciones rocosas reposan depósitos de origen aluvio torrencial y aluvio gravitacional, provenientes principalmente de la denudación de los materiales alterados que componen el Macizo de Santander, los cuales son transportados a lo largo de los cauces de corrientes de agua que nacen en éste.

3. Marco teórico

3.1 Refracción sísmica

La sísmica de refracción constituye uno de los métodos de prospección más tradicionales de la geofísica. Su principio fundamental se basa en la medición de los tiempos de viaje de ondas sísmicas generadas por una fuente impulsiva en la superficie del subsuelo (o cercana a ella) y que son refractadas en las interfaces entre medios (refractores) con propiedades físicas (i.e. impedancias acústicas) diferentes [4] (Figura 1).

El análisis de dichos tiempos de viaje, bajo ciertas hipótesis definidas y siguiendo las leyes de la propagación de ondas, permite en principio obtener un perfil en profundidad de la distribución geométrica de los diferentes refractores, con las correspondientes velocidades a las cuales la onda sísmica se propaga a través de ellos [5].

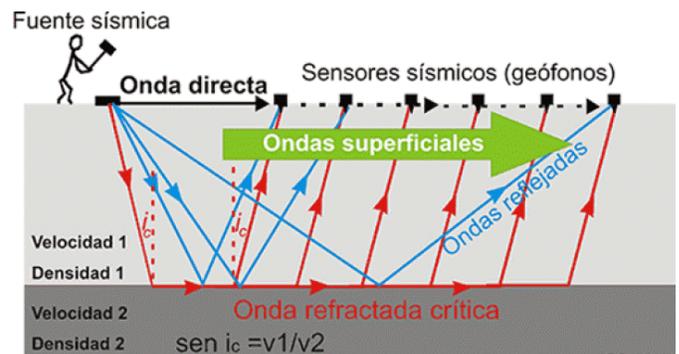


Figura 1. Esquema de las ondas generadas por medio de una fuente activa [6].

Es importante destacar, que una de las limitaciones del método sísmico de refracción es, su incapacidad para modelar inversiones de velocidad en el subsuelo (intercalaciones de estratos más blandos debajo de estratos más duros), puesto que la presencia de tal característica anula la posibilidad de que se produzca la refracción a ángulo crítico (paralela a la interfaz entre los dos medios), que es fundamental para que la onda pueda ser detectada de nuevo en la superficie [5]. Por lo tanto, una de las condiciones para la aplicación de la refracción sísmica es que exista un aumento de la velocidad con la profundidad en el subsuelo.

3.2 Ensayo de ondas superficiales MASW Las ondas Superficiales se conocen como la energía que viaja a lo largo o cerca de la superficie de la tierra la cual decrece rápidamente con la profundidad. Se Caracterizan por su relativa baja velocidad, bajas frecuencias, y alta amplitud. Estas ondas son generadas fácilmente por fuentes activas (Martillo) y fuentes pasivas como ruido ambiental, micro-tremores. Las ondas superficiales se presentan como movimientos elípticos verticales en la superficie, donde la dirección de las ondas varía de un lado a otro de la elipse.

3.3 Ensayo de tomografía eléctrica

El ensayo de Tomografía eléctrica o “Imagen Eléctrica”, se constituye en uno de los métodos de prospección más tradicionales de la geofísica [7]. Su principio fundamental se basa en la medición de corrientes y voltajes generados por una inyección de corriente inicialmente en la superficie y posteriormente al interior del terreno. A partir de un factor geométrico generado por el arreglo o dispositivo empleado, sumado a los valores de corriente y voltaje medidos se puede establecer los valores de resistividad aparente en profundidad y en forma lateral de la línea, lo cual se puede interpretar desde un punto de vista físico y geológico, encontrando información sobre las características físicas del subsuelo.

Es importante destacar, que una de las limitaciones del método eléctrico es, la presencia de capas muy resistividad en la superficie del terreno, lo que genera la imposibilidad de un buen funcionamiento del método, siendo necesario la utilización de otras técnicas, en este caso las electromagnéticas, en los que no se precisa un contacto físico con el suelo [8].

4. Análisis del sitio

Como parte de la investigación se empleó la información de referencia perteneciente al estudio geotécnico desarrollado en 2021 [9], el cual contiene una serie de doce perforaciones con profundidades de exploración entre 10.0 y 15.0 metros mediante equipos de SPT (Figura 2), los cuales permitieron la extracción de muestra y caracterización del terreno, sumado a lo anterior, a manera de complemento, fueron realizadas cuatro líneas sísmicas de refracción y MASW-2D junto con una tomografía eléctrica. Los diferentes

métodos de exploración permitieron determinar en el perfil geológico-geotécnico, en donde se encontró principalmente que los suelos del sector correspondían a niveles de suelos aluviales (Qab) de mediana a baja consistencia, pero que a profundidades variables aparece un nivel de roca tipo arenisca fracturada con bajos RQD y con ciertas intercalaciones de roca meteorizada.

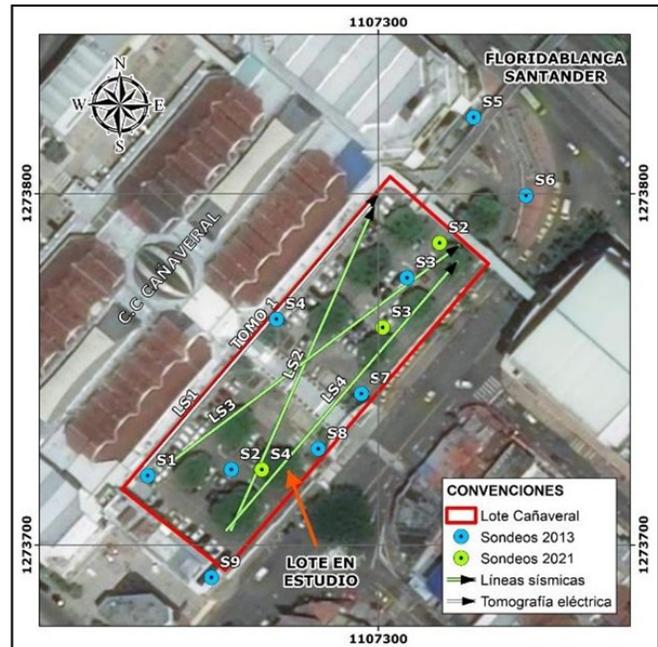


Figura 2. Exploración geotécnica directa e indirecta realizada en el área de estudio.

5. Análisis de la información

Dentro de la exploración realizada se encontró que los materiales dentro del área de estudio corresponden a suelos aluviales de Abanicos (Qab) compuestos por arenas arcillosas de consistencia medio densa a densa, bajo este estrato se presentan intercalaciones de suelos residuales compuestos arenas arcillosas y arcillas arenosas muy blandas y niveles rocosos de la Formación Girón (Jg) asociados a fragmentos de roca (triturada) y arenisca de la Formación Girón (Jg).

Es importante resaltar que las formaciones de rocas sedimentarias como Girón y otras presentan diferentes tipos de inclinaciones y pliegues que hace que los espesores donde aflora la roca varíen en profundidad y sean difíciles de identificar (Figura 3).

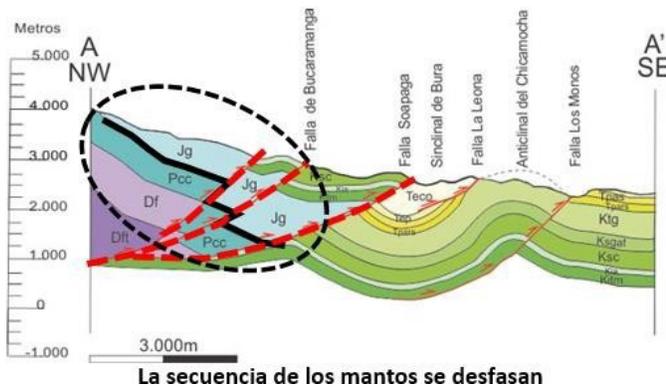


Figura 3. Ejemplo de las fallas o lineamiento de fallas geológicas [10].

Por otro lado, esta formación geológica presenta intercalaciones de rocas más blandas entre otras más duras, tal como se identificó en el sondeo 2 (Tabla 1) en donde se observó una secuencia de suelo suelto – roca – roca “triturada” – suelo residual.

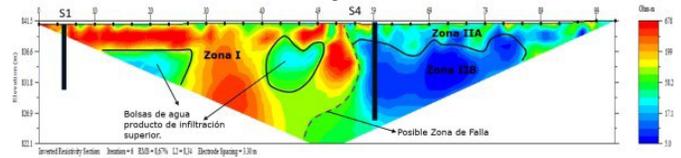
Tabla 1. Registro de perforación sondeo 2.

Prof. m	N	Descripción	S.U.C.S
0.0 a 5.5	3 a 33	SUELOS RESIDUALES compuestos por arenas arcillosas, no coherentes, de consistencia medio densa. Formación Girón (Jg).	SC
5.5 a 8.5	RT	NIVELES ROCOSOS de consistencia dura, de color naranja amarillento pálido, verde muy pálido y amarillo grisáceo. Formación Girón (Jg).	ROCA
8.5 a 10	8 a 37	NIVELES TRITURADOS compuestos por arenas arcillosas, con presencia de gravas semiangulosas, de consistencia muy densa. Formación Girón (Jg).	SC

Adicional a lo anterior, se logró identificar un lineamiento de falla en la tomografía eléctrica realizada (Figura 4). Esto es concordante con la actividad tectónica que originó las inclinaciones y pliegues en la roca. Además, se evidencian sectores con posibles zonas de alto fracturamiento en la roca y con acumulación de agua.

La **Zona I**, presenta resistividades que oscilan entre los 100 Ohm.m a 678 Ohm.m, asociadas con materiales rocosos de la formación Girón (Jg). Sin embargo, se aprecian bolsas con acumulación de agua, debido a la infiltración superficiales (roca muy fracturada).

Tomografía No. 1



La **Zona IIA**, presenta resistividades que oscilan entre los 10 Ohm.m a 30 Ohm.m, asociadas con materiales arenos arcillosos con gravas, húmedos. La **Zona IIB**, esta relacionada con materiales competentes (transición de suelos residuales a roca) de la Formación Girón (Jg), con un alto contenido de humedad.

Nota: La **Zona II**, se presenta bajas resistividades, que pueden estar asociadas a dos factores: 1. Alto fracturamiento de la roca y acumulación de agua, 2. Redes eléctricas muy conductivas halladas muy cercanas a la superficie del terreno donde se realizó el ensayo, interfiriendo con la mitad de las medidas del ensayo de Tomografía.

Figura 4. Tomografía eléctrica realizada en donde se observa una posible zona de falla y acumulación de agua.

Teniendo en cuenta lo anterior y debido a que existen diferentes tipos de inclinaciones y pliegues en la roca, los espesores de esta varían en profundidad y son difíciles de identificar con precisión, por esta razón, se emplearon los ensayos geofísicos consistentes en MASW 2D y refracción sísmica, en donde se definieron velocidades de ondas compresionales de 1830 m/s y de cortante de 760 m/s como valores de referencia según las tablas 2 y 3 respectivamente para la roca tipo arenisca encontrada en el sector.

Tabla 2. Rango de velocidades de ondas compresionales en suelo y roca.

Natural soil androck	Velocity (ft/s)	Velocity (m/s)
Weathered surfacematerial	800 to 2000	240 to 610
Gravel or Dry sand	1500 to 3000	460 to 915
Sand (saturated)	4000 to 6000	1220 to 1830
Clay (Saturated)	3000 to 9000	915 to 2750
Water	4700 to 5000	1430 to 1665
Sea Water	4800 to 5000	1460 to 1525
Sandstone	6000 to 13000	1830 to 3960
Shale	9000 to 14000	2750 to 4270
Chalk	6000 to 13000	1830 to 3960
Limestone	7000 to 20000	2134 to 6100
Granite	15000 to 19000	4575 to 5800
Metamorphic rock	10000 to 23000	3050 to 7000

Tabla 3. Clasificación según el rango de velocidades de ondas cortante en suelo y roca.

Soil Types	Rock/Soil Descriptio n	Average shear wave velocity (Vs30) m/s
A	Hard rock	> 1500
B	Rock	760 – 1500
C	Dense soil/soft rock	360 – 760
D	Stiff soil	180 – 360
E	Soft soil	< 180
F	Special soils requiring special evaluation	-

Con base en los valores determinados, se realizó un modelo 3D del área de estudio (Figura 5 y Figura 6) el cual fue calibrado mediante la exploración directa realizada y los ensayos geofísicos disponibles, lo cual dio como resultado el siguiente mapa de zonificación de la profundidad de la roca de acuerdo con los resultados tanto del ensayo de MASW 2D como del ensayo de refracción, en donde se obtuvieron valores de velocidad de onda cortante y compresional respectivamente.

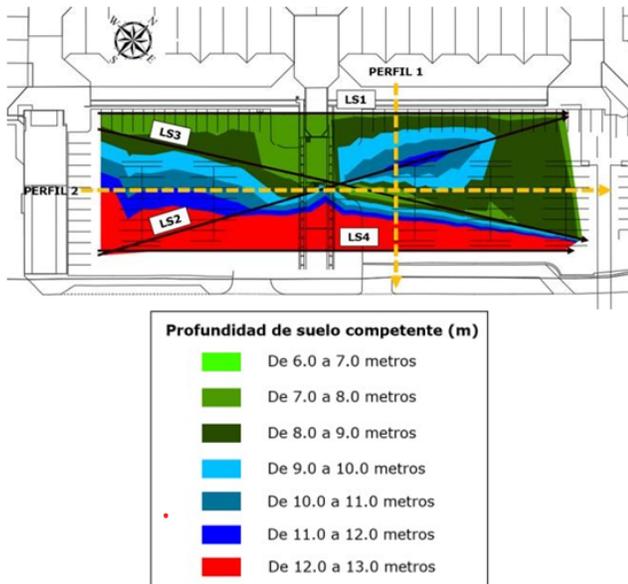


Figura 5. Zonificación profundidad de la roca según ensayo de MASW-2D.

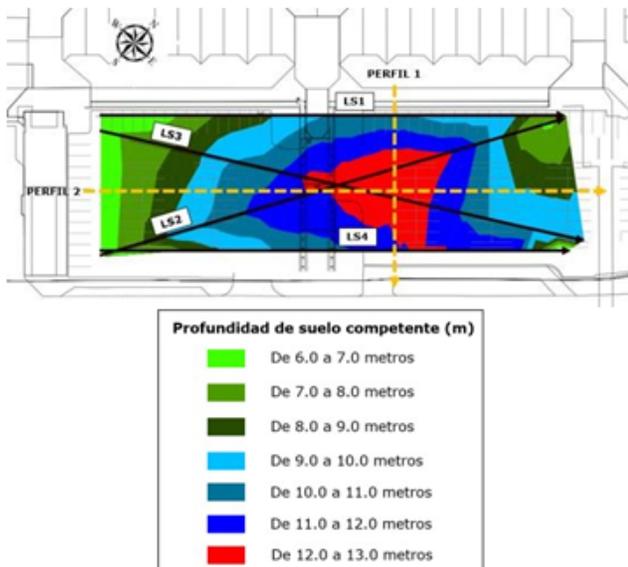


Figura 6. Zonificación profundidad de la roca según ensayo de refracción sísmica.

Estos valores fueron luego comparados con las profundidades de roca realmente encontradas en campo durante la fase de excavación de los caissons del centro comercial, cabe resaltar que durante la extracción del material se pudo identificar superficialmente un suelo aluvial compuesto principalmente por arenas arcillosas y arcillas arenosas con presencia de bolos, y se realizó una clasificación de tres tipologías de roca según su resistencia.

El material rocoso fue clasificado dentro de tres categorías principales:

- Roca tipo I: Roca blanda, se parte con la mano. No apto para cimentación de cargas altas.
- Roca tipo II: No es deleznable con la mano, pero si a los impactos con el suelo u otras rocas. No apto para cimentación de cargas altas.
- Roca tipo III: Roca muy dura, la definida en diseño para cargas altas, no se parte con golpes con suelo u otras rocas y menos con la mano. Apto para cimentación de cargas altas.

A continuación, se presenta una tabla comparativa en donde se muestra las diferencias encontradas en la profundidad de la roca empleando las velocidades de onda V_s y V_p respecto a los valores de profundidad de roca reportados en campo.

Nota: La Figura 7 muestra la nomenclatura de cada uno de los caissons referenciados en la Tabla 4.

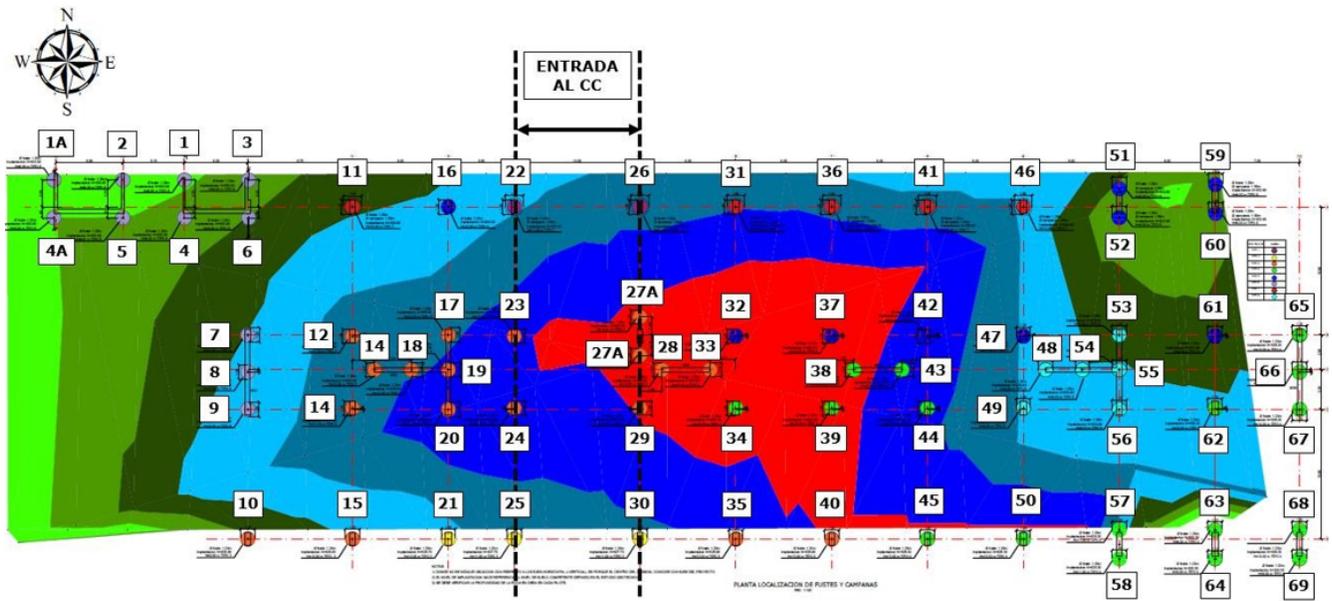


Figura 7. Nomenclatura de los caissos ejecutados en campo.

Tabla 4. Comparativo entre la profundidad de roca terminada mediante ensayos geofísicos y la determinada

#	Nivel estimado Vs (m)	Nivel estimado Vp (m)	Nivel de roca en campo (m)	Error Vs	Error Vp	25	12.0	10.0	8.0	50%	25%
1	7.0	6.0	4.1	71%	46%	26	8.0	10.0	6.4	25%	56%
1A	7.0	6.0	4.1	71%	46%	27A	9.0	12.0	9.7	7%	24%
2	7.0	6.0	4.3	63%	40%	27B	8.0	12.0	9.5	16%	26%
3	7.0	6.0	4.9	43%	22%	28	7.0	12.0	9.6	27%	25%
4	7.0	6.0	3.8	84%	58%	29	10.0	12.0	9.2	9%	30%
4A	7.0	6.0	4.1	71%	46%	30	12.0	10.0	8.1	48%	23%
5	7.0	6.0	3.8	84%	58%	31	8.0	10.0	7.5	7%	33%
6	7.0	9.0	4.6	52%	96%	32	9.0	12.0	9.5	5%	26%
7	10.0	9.0	5.9	69%	53%	33	6.0	12.0	10.1	41%	19%
8	10.0	9.0	5.6	79%	61%	34	9.0	12.0	9.5	5%	26%
9	11.0	9.0	7.5	47%	20%	35	12.0	11.0	9.4	28%	17%
10	12.0	8.0	8.0	50%	0%	36	9.0	10.0	8.0	13%	25%
11	7.0	8.0	4.7	49%	70%	37	9.0	12.0	7.7	17%	56%
12	9.0	10.0	7.0	29%	43%	38	8.0	12.0	7.7	4%	56%
13	10.0	10.0	8.3	20%	20%	39	7.0	12.0	7.2	3%	67%
14	11.0	10.0	10.0	10%	0%	40	12.0	12.0	8.7	38%	38%
15	12.0	9.0	10.1	19%	11%	41	9.0	10.0	7.0	29%	43%
16	7.0	9.0	5.1	37%	76%	42	9.0	11.0	7.0	29%	57%
17	8.0	10.0	10.5	24%	5%	43	8.0	11.0	7.1	13%	55%
18	9.0	10.0	10.1	11%	1%	44	8.0	11.0	7.1	13%	55%
19	9.0	11.0	8.5	6%	29%	45	12.0	12.0	8.3	45%	45%
20	10.0	11.0	9.1	10%	21%	46	8.0	9.0	7.2	11%	25%
21	12.0	9.0	8.0	50%	13%	47	8.0	9.0	6.7	19%	34%
						48	8.0	9.0	6.7	19%	34%
						49	7.0	9.0	7.0	0%	29%
						50	12.0	12.0	7.8	54%	54%
						51	8.0	7.0	7.2	11%	3%
						52	8.0	7.0	7.0	14%	0%
						53	8.0	8.0	7.1	13%	13%
						54	8.0	9.0	7.1	13%	27%
						55	8.0	9.0	7.0	14%	29%

56	8.0	9.0	7.0	14%	29%
57	12.0	11.0	11.0	9%	0%
58	12.0	11.0	9.6	25%	15%
59	7.0	7.0	7.1	1%	1%
60	7.0	7.0	7.0	0%	0%
61	8.0	8.0	6.5	23%	23%
62	8.0	9.0	7.9	1%	14%
63	12.0	11.0	10.8	11%	2%
64	12.0	11.0	11.2	7%	2%
65	7.0	8.0	9.6	27%	17%
66	7.0	9.0	9.6	27%	6%
67	7.0	9.0	11.8	41%	24%
68	12.0	10.0	12.0	0%	17%
69	12.0	10.0	12.0	0%	17%

Según lo anterior, se encontró que las profundidades en campo reportadas se ajustan en promedio con un porcentaje de error entre el 27 y 29%. Es posible que estos errores se deban a la gran cantidad de interferencias presentadas en el área de estudio mayormente relacionadas con el ruido ambiental y la presencia de humedad superficial en algunos sectores al momento de la ejecución de los ensayos. Pese a que estas pruebas fueron realizadas en horas nocturnas, el sector donde se encuentra el centro comercial se caracteriza por estar rodeado de avenidas muy concurridas inclusive en horario nocturno, con lo cual el ruido y vibraciones de los vehículos pudo haber alterado de cierta forma la toma de datos. A continuación, se presenta el perfil estratigráfico determinado (Figura 8).



Figura 8. Perfil 1 - Zonificación profundidad de los diferentes mantos de suelo y roca.

6. Conclusiones y discusión

Se determinó una aproximación de los niveles de roca presentes en el área de expansión del centro comercial Cañaveral, en donde, además se encontró la presencia de suelos aluviales compuestos por arenas arcillosas de consistencia medio densa a densa con presencia de bolos, bajo este material se reportaron suelos residuales compuestos por arenas arcillosas y arcillas arenosas. Finalmente, en profundidad aparece un nivel asociado a fragmentos de roca (triturada) y arenisca de la Formación Girón (Jg). Teniendo en cuenta la necesidad de cimentar sobre el nivel rocoso debido a las altas cargas proyectadas para la edificación, se realizaron modelos e integración de la información disponible “Big Data” en los cuales se generó un mapa 3D de las profundidades de los

niveles de roca que sirvió como insumo para el diseño y presupuesto de los cimientos, los cuales fueron verificados mediante una supervisión constante durante la construcción en donde se logró determinar porcentajes de error de 29% y 27% para los mapas generados mediante el complemento de la exploración directa y el ensayo de refracción sísmica y el complemento de la exploración directa y el ensayo de MASW-2D respectivamente. Si bien esta variación parece no ser considerable entre ambos modelos de Vs y Vp, es importante resaltar que existió un mejor ajuste en algunas zonas con Vs y en otras zonas con Vp debido posiblemente a que hubo mayores acumulaciones de humedad en ciertos sectores afectando las mediciones sobre todo del ensayo de refracción sísmica.

Durante la ejecución del proyecto se pudo evidenciar la presencia de intercalaciones entre rocas más blandas a rocas más duras tal y como se evidenció en los sondeos realizados. Además, esto confirmó la disposición de la roca en el sector como una roca con inclinaciones y pliegues los cuales hacen difícil la identificación de las profundidades de la roca para la cimentación. La geofísica permitió estimar de mejor forma estas profundidades e inclusive determinó un lineamiento de falla existente en el sitio el cual es concordante con la variabilidad de los niveles de roca encontrados.

Los desfases encontrados respecto a los valores reales reportados en campo pueden obedecer a distintos factores entre los cuales se encuentra principalmente el nivel de ruido encontrado en el sector al momento de hacer los ensayos, sumado a lo anterior, tenemos la presencia de intercalaciones de rocas blandas a rocas duras y viceversa. Un claro ejemplo de esto fue el reporte del sondeo 2 en donde se observó una secuencia de suelo suelto - roca - roca “triturada - suelo residual y nueva mente roca. Otro de los factores importantes para tener en cuenta fue la alta variabilidad de la roca con cambios abruptos en las profundidades de estas, los cuales al emplear una separación entre geófonos relativamente alta (4.4 m) pudieron quedar tramos considerables sin información en los cuales la información faltante fue interpolada descartando algunos lomos y plegamientos naturales en la roca (Figura 9). Además, la presencia de humedades altas en el terreno evidenciadas en la tomografía eléctrica realizada pudo interferir en la toma de datos reduciendo los valores de resistividad.

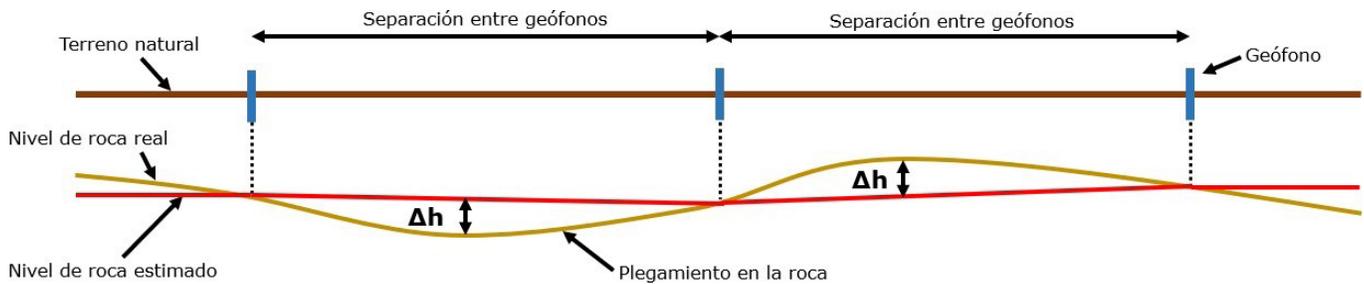


Figura 9. Variabilidad en los niveles de roca vs espaciamiento de los geófonos.

En futuros proyectos en donde se apliquen estas técnicas para la determinación de la profundidad de los niveles de roca, se recomienda, emplear líneas sísmicas cortas con separaciones entre geófonos inferiores a 2.5 metros, para de esta forma reducir la incertidumbre en sitios donde se presenten plegamientos e inclinaciones de la roca. Además, se recomienda también, realizar los ensayos en un horario en donde se presente la menor cantidad de ruido ambiental ya que este puede afectar considerablemente los resultados. No se recomienda aplicar estos métodos en zonas industriales o de procesos que contengan altos niveles de vibraciones y ruidos externos. Además, es importante resaltar la necesidad de amarrar la exploración que se realice a un levantamiento topográfico, esto con motivo de garantizar que la ubicación de todos los ensayos sea la correcta y que al momento de generar los modelos 2D, estos se ajusten de una mejor manera a las condiciones reales de la zona.

7. Referencias

- [1] C. Lazaro, C. Valencia y C. Torres, “Optimización de la identificación de variabilidad del subsuelo usando métodos indirectos (MASW 2D y refracción sísmica) en la Av. Carlos Izaguirre”. Lima, Perú, 2021.
- [2] M. Pérez-Giraldo y J. D. Yepes- Tumay, “Diseño geométrico de una zapata doble para cimentación aplicada en torres de transmisión eléctrica”, *Revista Ingenio*, vol. 18, n.º 1, pp. 17–24, ene. 2021, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2385>
- [3] O. A. Cuanalo-Campos, R. Ayala- Aranda, y L. J. Quintero-Lemus, “Diseño geotécnico y dinámico de la cimentación para una máquina laminadora de mármol en la ciudad de Puebla, México” *Rev. Ingenio*, vol. 21, n.º 1, pp. 1–8, ene. 2024, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.3588>
- [4] Sincrona “Refracción por Microtremores – ReMi”. 2024. [online] Available: <https://www.sincrona.cl/ensayo-remi/#:~:text=La%20s%C3%ADsmica%20de%20refracci%C3%B3n%20constituye,son%20refractadas%20en%20las%20interfaces.>
- [5] Redpath, B. B. “Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations”. Technical Report E-73-4, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 1973.
- [6] Instituto Geológico de Catalunya (IGC), “Mapa de mesozonación sísmica de Catalunya (1:100.000), adaptado a la clasificación EC-8”. Informe IGC G S - 008/11. Instituto. C/Balmes, 209-211 08006 Barcelona, España, 2021.
- [7] Arias, D. “Exploración Geotécnica - Relaciones Geoelectricas” (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. 2011.
- [8] Empresas Públicas de Medellín (EPM). “Medida de Resistividad Eléctrica Del Suelo” (RA6014). 2010. [online] Available: https://www.epm.com.co/content/dam/epm/p_roveedores-y-contratistas/RA6-014.pdf.
- [9] Geotecnología. “Proyecto: Ampliación sector sur Centro comercial cañaveral Calle 30 -carrera 25” Floridablanca - Santander. 2021.
- [10] Villar, A., Alarcón, H., Jiménez, G., y Velandia, F. “Zonas transversales en el dominio axial de la Cordillera Oriental - bloque yacente de la Falla de Soapaga (Sátiva sur - Sátiva norte, Boyacá)”. *Boletín de Geología*, 39(3): 13-23, 2017.
- [11] ASTM Designation D5777. “Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation”, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U.S.A. 1995.
- [12] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Tomo 2, 2010.