

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Evaluación de las condiciones de estabilidad del terreno para la instalación de un parque solar
fotovoltaico en una zona clausurada del relleno sanitario el Carrasco de Bucaramanga

Jesús Alberto Alvarez Rincón

Trabajo de Investigación para Optar al Título de Magister en Geofísica

Director

Vladimir Ernesto Merchan Jaimes

PhD. en Ingeniería del Terreno Cartográfica y Geofísica

Codirector

Alvaro Viviescas Jaimes

PhD. en Ingeniería de la Construcción

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Maestría en Geofísica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A todas las personas que, de una u otra forma, hicieron parte de este proceso.

A mi familia, por ser mi raíz y mi fuerza constante. A los amigos que estuvieron presentes con su compañía, ánimo y comprensión, incluso en la distancia. A los profesores y mentores que compartieron su conocimiento con generosidad y exigencia, y que me motivaron a seguir aprendiendo.

A quienes confiaron en mí cuando más lo necesitaba, a quienes me regalaron palabras sinceras en los momentos de duda, y a quienes, con pequeños gestos, marcaron una gran diferencia.

Este logro no es solo mío, sino también de quienes caminaron conmigo en este trayecto. A todos, gracias.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo.

A la Empresa de Aseo de Bucaramanga – EMAB, por brindar el espacio, la disposición y el apoyo necesarios para el desarrollo de este estudio. Su colaboración fue fundamental para la toma de datos y el acceso a información clave.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Geofísica, por ofrecer la formación académica, los recursos técnicos y el acompañamiento que sustentan esta investigación. Gracias por facilitar el acceso a bibliografía especializada, equipos y espacios de trabajo.

También agradezco a quienes contribuyeron en la preparación de tablas, figuras e ilustraciones, así como a quienes dedicaron tiempo a la lectura crítica y revisión del documento, aportando valiosas sugerencias para su mejora.

Este trabajo es el resultado de un esfuerzo colectivo, y mi gratitud es para todos los que, con su ayuda, lo hicieron posible.

Tabla de Contenido

		Pág.
1	Introducción	16
2	Objetivos.....	19
2.1	Objetivo general.....	19
2.2	Objetivos específicos	19
3	Antecedentes	20
3.1	Localización de El Carrasco	20
3.2	Estabilidad del relleno sanitario.....	22
3.3	Cárcava 1	23
3.4	Composición de un relleno sanitario.....	24
4	Marco de referencia	26
4.1	Fundamentos métodos geofísicos	26
4.1.1	Tomografías de resistividad eléctrica	27
4.1.2	Exploración sísmica	30
4.2	Marco geotécnico.....	34
4.2.1	Parámetros geotécnicos o geomecánicos	34
4.2.2	Mecanismos de asentamiento	37
4.2.3	Etapas de asentamiento	38
4.3	Modelos de asentamiento.....	39
4.3.1	Modelo Hiperbólico	40
4.3.2	Modelo Exponencial	40
4.3.3	Modelo de Marques et al. (2003).....	41

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

4.3.4	Teoría de consolidación de Zeevaert (1984).....	42
4.3.5	Modelo linear viscoso	43
5	Metodología	46
5.1	Geofísica en campo.....	47
5.1.1	Adquisición Geoeléctrica.....	47
5.1.2	Adquisición sísmica	48
5.2	Procesamiento perfiles geofísicos.....	49
5.2.1	Procesamiento Tomografías de Resistividad Eléctrica.....	49
5.2.2	Procesamiento Sísmico de Refracción.....	52
5.2.3	Procesamiento MASW.....	54
5.3	Ensayo cargas piloto	55
5.4	Selección del modelo teórico de estimación de asentamiento	57
5.5	Modelado Code Bright.....	58
6	Resultados	66
6.1	Adquisición geofísica.....	66
6.1.1	Resultados Tomografía de Resistividad Eléctrica	66
6.1.2	Resultados Sísmica de refracción	66
6.1.3	Resultados Sísmica MASW	68
6.2	Calculo módulos dinámicos.....	68
6.2.1	Estimación de parámetros elásticos 1D	68
6.2.2	Estimación de parámetros elásticos 2D	69
6.3	Resultado cargas piloto	75
6.4	Modelo teórico	76

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

6.5	Modelado Code Bright.....	77
7	Discusión.....	83
7.1	Discusión geofísica	83
7.2	Discusión parámetros geotécnicos	86
7.3	Discusión modelo asentamiento	87
8	Conclusiones y recomendaciones	89
9	Referencias Bibliográficas	92

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Coordenadas de los puntos seleccionados para el ensayo de cargas piloto. Sistema de Magna Sirgas EPSG: 3116. Tomado de Leal y Becerra (2023).	55
Tabla 2 Módulos dinámicos calculados para los resultados de Sísmica de Refracción y MASW del 8 de marzo de 2022. Valores correspondientes a la abscisa X=46.0 metros a lo largo de la línea sísmica.....	69

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Vista aérea del Relleno Sanitario. El Carrasco". Bucaramanga, Santander.	17
Figura 2 Localización del área de estudio dentro del Relleno Sanitario "El Carrasco", en la Cárcava 1.....	21
Figura 3 Composición general de los rellenos sanitarios Nota. Composición de rellenos sanitarios para algunos países de referencia. Adaptado de A review on settlement models of municipal solid waste landfills (Ren et al., 2022).	24
Figura 4 Adquisición de Tomografías de Resistividad Eléctrica. Tomado de Scapozza y Laigre (2013).....	28
Figura 5 Matrices utilizadas según el arreglo de electrodos. Tomado de Loke,1999.....	29
Figura 6 Esquema de propagación de las ondas en la exploración sísmica.....	31
Figura 7 Diagrama que muestra trayectorias de los rayos de onda directa, onda refractada y el frente de onda en un modelo de dos capas.....	31
Figura 8 Ejemplo de curva de dispersión. Tomado de Xia (2014)	33
Figura 9 Etapas de asentamientos en el tiempo. Tomado de Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios (Rivera, 2012).	39
Figura 10 Localización del perfil geofísico general en el área de estudio. Se localizan las.....	46
Figura 11 Terrameter LS y accesorios para la adquisición de geo-eléctrica en el Carrasco.	47
Figura 12 Sismógrafo GEA24 y accesorios para la adquisición sísmica en el Carrasco empleados.	48
Figura 13 Filtrado de valores de resistividad que no conservan una tendencia en cada nivel (puntos de color celeste) para el arreglo Dipolo-Dipolo.....	50

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 14 Histograma y crossplot del error RMS para el arreglo Dipolo-Dipolo, donde se procede a eliminar valores que están por fuera de la tendencia de dispersión (puntos de color rojo).	51
Figura 15 Modelo final del proceso de inversión para el arreglo Dipolo-Dipolo considerando la topografía.	51
Figura 16 Dromocronas donde se evidencian los cambios de pendiente y se procede a la asignación de las capas para posterior generación de modelo inicial y ser usado para la tomografía sísmica	53
Figura 17 Modelo inicial simple considerado para la generación de la tomografía sísmica. Tanto el modelo inicial como la tomografía sísmica consideran el principio de que la velocidad aumenta en profundidad.	53
Figura 18 Visualización de la ubicación de los sensores sísmicos y puntos de disparos para la adquisición de MASW.	54
Figura 19 Curvas de dispersión para la evaluación de calidad señal-ruido para la adquisición de MASW 2SD.	55
Figura 20 a) Montaje de la placa base para ubicar la regla de medición y las cargas aplicadas progresivamente para realizar la b) medición del asentamiento a lo largo de periodo de evaluación. Tomado de Leal y Becerra (2023).	56
Figura 21 a) Valores de porosidad para cada una de las capas en el Modelo 02a con valores entre el 25–30% (0.25-0.6), b) Desplazamiento en la vertical o eje Y en el minuto 0, y c) minuto 60.	60
Figura 22 a) Valores de porosidad para cada una de las capas en el Modelo 02b con valores entre el 25–60% (0.25-0.6), b) Desplazamiento en la vertical o eje Y en el minuto 0, y c) minuto 60.	61
Figura 23 a) Modelo discretizado ajustado considerando los resultados de las pruebas de cargas piloto y la geofísica. b) localización de los cinco puntos para aplicar las cargas en la simulación. c) Ajuste en las condiciones de frontera.	63

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 24 Desplazamiento en Y del modelo considerando cinco puntos de carga a 1 día de simulación.....	64
Figura 25 Desplazamiento en Y del modelo considerando cinco puntos de carga a 3 mes de simulación.....	64
Figura 26 Desplazamiento en Y del modelo considerando cinco puntos de carga a 1 año de simulación.....	65
Figura 27 Desplazamiento en Y del modelo considerando cinco puntos de carga a 10 años de simulación.....	65
Figura 28 Resultados de las adquisiciones geofísicas y su procesamiento de la TRE, Sísmica de Refracción y MASW realizados el 8 de marzo de 2022. Considerando los resultados de los tres modelos se diferenciaron para el modelo en Code Bright siete (7) capas horizontales.....	67
Figura 29 Modelos 2D de parámetro geotécnico correspondiente a Poisson calculado a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S de la adquisición sísmica.	70
Figura 30 Modelos 2D de la densidad calculado a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S de la adquisición sísmica.	71
Figura 31 Modelos 2D de parámetro geotécnico correspondiente a Rigidez calculado a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S de la adquisición sísmica.	72
Figura 32 Modelos 2D de parámetro geotécnico correspondiente a Young calculado a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S de la adquisición sísmica.	73
Figura 33 Modelos 2D de parámetro geotécnico correspondiente a Bulk calculado a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S de la adquisición sísmica.	74
Figura 34 Relación de velocidades de onda P y onda S obtenidas de adquisición sísmica. La expresión utilizada corresponde a V_p/V_s	75

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 35 Curvas de asentamiento en el tiempo para: a) Punto 1 y b) Punto 2, registradas durante el primer día de aplicación de las cargas. Tomado de Leal y Becerra (2023).	76
Figura 36 Curvas de asentamiento en el tiempo para el a) Punto 1 y b) Punto 2, correspondientes al periodo posterior a la aplicación total de la carga localizada. Tomado de Leal y Becerra (2023).	76
Figura 37 Modelo de asentamientos totales del punto 1 en tiempo total. Tomado de Leal y Becerra (2023).	78
Figura 38 Modelo de asentamientos totales del punto 2 en tiempo total. Tomado de Leal y Becerra (2023).	79
Figura 39 Evolución del asentamiento en el punto P1 localizado en la Cárcava 1 en las coordenadas 1274627.155 Este y 1103215.356 Norte.	81
Figura 40 Perfil de asentamiento a 10 m de profundidad tras 10 años.	82

Resumen

Título: Evaluación de las condiciones de estabilidad del terreno para la instalación de un parque solar fotovoltaico en una zona clausurada del relleno sanitario el Carrasco de Bucaramanga*

Autor: Jesús Alberto Alvarez Rincón**

Palabras Clave: métodos geofísicos, estabilidad de rellenos sanitarios, tomografía de resistividad eléctrica, MASW, modelado numérico, energías renovables, El Carrasco.

Descripción: El cierre definitivo de rellenos sanitarios plantea desafíos tanto ambientales como técnicos, pero también oportunidades para el desarrollo de proyectos sostenibles, como la generación de energía solar. Este estudio evalúa las condiciones de estabilidad del terreno en una zona clausurada del Relleno Sanitario El Carrasco, en Bucaramanga, con el fin de determinar su viabilidad para la instalación de un parque solar fotovoltaico. Para ello, se integraron métodos geofísicos no destructivos (tomografía de resistividad eléctrica, sísmica de refracción y análisis MASW), un ensayo de carga piloto y modelamiento numérico en 2D utilizando el software GID-Code Bright. Los resultados revelan una marcada heterogeneidad estratigráfica y mecánica del subsuelo, con la identificación de siete capas casi horizontales diferenciadas por sus propiedades dinámicas. Se evidenciaron zonas blandas asociadas a materiales saturados y lixiviados, con alto potencial de asentamiento diferencial. El modelo numérico permitió simular el comportamiento

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Maestría en Geofísica. Director: Vladimir Ernesto Merchan Jaimes. PhD. en Ingeniería del Terreno Cartográfica y Geofísica. Codirector: Alvaro Viviescas Jaimes. PhD. en Ingeniería de la Construcción

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

del terreno bajo carga, destacando la importancia de una adecuada zonificación y monitoreo continuo. Este trabajo ofrece una metodología replicable para otras ciudades que buscan reaprovechar espacios clausurados, aportando criterios técnicos para el diseño de proyectos de infraestructura sobre terrenos de origen antrópico.

Abstract

Title: Assessment of ground stability conditions for the installation of a photovoltaic solar park in a closed area of the El Carrasco landfill in Bucaramanga*

Author(s): Jesús Alberto Alvarez Rincón **

Key Words: geophysical methods, landfill stability, electrical resistivity tomography, MASW, numerical modeling, renewable energy, El Carrasco.

Description: The final closure of sanitary landfills poses both environmental and technical challenges, but also offers opportunities for sustainable development, such as solar energy generation. This study evaluates the stability conditions of the terrain in a closed section of the El Carrasco Landfill, located in Bucaramanga, Colombia, to assess its suitability for the installation of a photovoltaic solar park. A combination of non-invasive geophysical methods (electrical resistivity tomography, seismic refraction, and MASW), a pilot load test, and 2D numerical modeling using the GiD-Code Bright software was applied. Results revealed significant stratigraphic and mechanical heterogeneity in the subsurface, with seven quasi-horizontal layers identified based on dynamic properties. Soft zones associated with saturated waste and leachate accumulation were detected, indicating high potential for differential settlement. The numerical model successfully simulated terrain behavior under load and emphasized the need for zonification and continuous monitoring. This research provides a replicable methodology for other cities

* Degree Work

** Faculty of Sciences. School of Physics. Master's in Geophysics. Advisor: Vladimir Ernesto Merchan Jaimes, Ph.D. in Geotechnical, Cartographic, and Geophysical Engineering. Co-advisor: Alvaro Viviescas Jaimes, Ph.D. in Construction Engineering.

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

aiming to repurpose closed landfill sites, contributing technical criteria for infrastructure planning on anthropogenic terrains.

1 Introducción

En las grandes ciudades, los terrenos que albergaron rellenos sanitarios clausurados representan un potencial sub-utilizado. Estos espacios, una vez estabilizados, pueden convertirse en áreas estratégicas para la implementación de proyectos de generación de energía a partir de fuentes renovables. Sin embargo, debido a la naturaleza heterogénea y dinámica de los residuos urbanos, cualquier intervención constructiva requiere una evaluación geotécnica previa que determine la viabilidad del uso del terreno. Este tipo de análisis resulta fundamental para definir no solo los materiales adecuados para la construcción, sino también el número y tipo de estructuras que pueden instalarse sin comprometer la estabilidad del terreno.

El Relleno Sanitario El Carrasco se localiza al suroccidente de la ciudad de Bucaramanga, sobre la vía hacia Girón, en el barrio El Porvenir, comuna 11 sur. Este sitio está emplazado en una cañada natural sobre depósitos aluviales de la meseta de Bucaramanga, dentro del área sustraída del Distrito de Manejo Integrado (DMI), en el sector conocido como Malpaso (Figura 1). Dado el interés por desarrollar un parque solar fotovoltaico en este terreno clausurado, se hace necesario evaluar sus condiciones geotécnicas. Esta etapa es clave para el diseño y dimensionamiento adecuado del proyecto, permitiendo anticipar los posibles comportamientos del suelo ante cargas estructurales y determinar zonas aptas para la instalación segura de paneles solares y casetas de servicio. Más allá del caso puntual, esta investigación busca también servir como referencia para otras ciudades del país que enfrentan procesos similares de cierre y reaprovechamiento de rellenos sanitarios, aportando criterios técnicos para convertir estas áreas en espacios productivos y sostenibles. La pregunta central que guía este estudio es:

- ¿Existen condiciones de estabilidad suficientes en una zona clausurada del relleno sanitario El Carrasco de Bucaramanga para permitir la instalación de un parque solar fotovoltaico?

Figura 1

Vista aérea del Relleno Sanitario. El Carrasco". Bucaramanga, Santander.



Durante los primeros años posteriores al cierre de un relleno, el terreno experimenta asentamientos progresivos que, con el tiempo, tienden a estabilizarse. Evaluar esta evolución es esencial para determinar si el sitio puede soportar nuevas cargas. Por ello, el presente estudio planteó una caracterización geotécnica integral del terreno mediante la combinación de métodos geofísicos no destructivos (sísmica de refracción, tomografía de resistividad eléctrica y MASW), los cuales consideraron estudios de ensayos de carga piloto para observar asentamientos inmediatos y diferidos, y simulaciones numéricas utilizando el software GiD–Code Bright.

Los resultados obtenidos revelan una alta heterogeneidad estratigráfica y mecánica del subsuelo. La tomografía de resistividad eléctrica permitió identificar zonas con materiales saturados o contaminados y posibles focos de lixiviación. La sísmica de refracción mostró un incremento gradual en la velocidad de onda P con la profundidad, mientras que el análisis MASW

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

evidenció importantes variaciones laterales en la velocidad de onda S, asociadas a materiales sueltos en superficie y capas más rígidas en profundidad. Con base en estas velocidades, se calcularon módulos dinámicos como el coeficiente de Poisson, densidad, módulo de rigidez, módulo de Young, módulo de compresibilidad (Bulk) y la relación V_p/V_s , lo cual permitió zonificar el terreno en siete capas cuasi horizontales con propiedades mecánicas diferenciadas.

El modelo numérico en 2D, calibrado con datos de campo, reprodujo adecuadamente los asentamientos observados bajo carga, confirmando que los sectores con menor rigidez dinámica presentan mayores deformaciones. Además, se demostró que las condiciones hidráulicas influyen de manera crítica en la estabilidad del relleno. La integración de resistividad, velocidades sísmicas y módulos dinámicos permitió identificar un sustrato basal rígido y capas superiores asociadas a procesos de biodegradación, acumulación de lixiviados y reacomodamiento de residuos, responsables de los asentamientos diferenciales observados.

Esta zonificación estratigráfico-mecánica aporta información clave para la toma de decisiones sobre la ubicación de estructuras dentro del relleno. Se identificaron sectores críticos que demandan monitoreo continuo, particularmente aquellos con alta relación V_p/V_s y bajo módulo de Young. En conjunto, este trabajo demuestra que la aplicación combinada de métodos geofísicos y modelamiento numérico constituye una herramienta efectiva para evaluar la viabilidad de proyectos de aprovechamiento sobre rellenos sanitarios clausurados.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar la evaluación de las condiciones de estabilidad del terreno en una zona clausurada del relleno sanitario el Carrasco de Bucaramanga.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar mediante métodos geofísicos (MASW, TRE y TRS) diferentes parámetros geotécnicos (propiedades elásticas y resistividad), que permitan realizar una evaluación de las condiciones mecánicas del subsuelo.
- Evaluar mediante un ensayo de campo con carga piloto los asentamientos inmediatos y diferidos en el tiempo representativos del relleno sanitario “El Carrasco”.
- Seleccionar un modelo teórico de comportamiento-esfuerzo-deformación-tiempo que permita realizar una estimación de la evolución de los asentamientos en el tiempo.
- Calibrar y validar el modelo geotécnico del subsuelo a partir de la información recolectada en campo y el modelo teórico definido.

3 Antecedentes

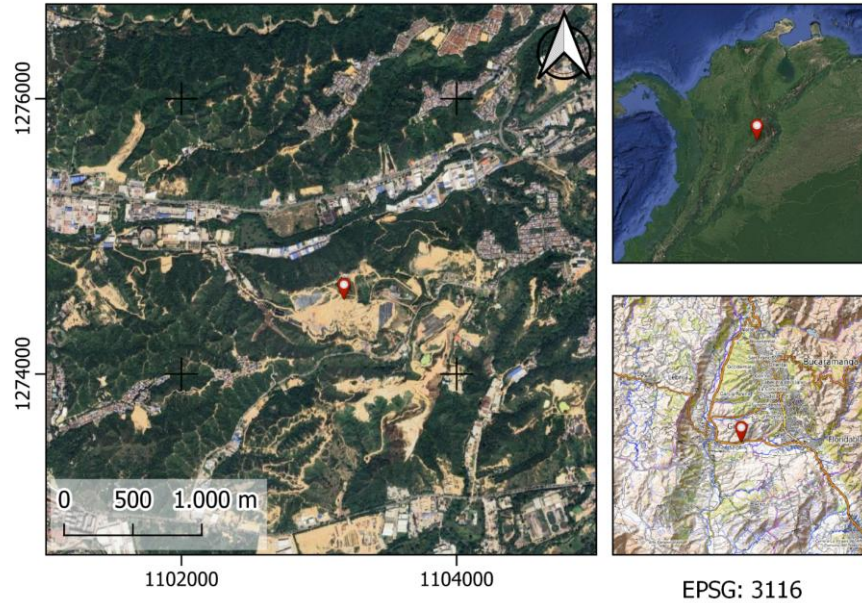
3.1 Localización de El Carrasco

El sitio de disposición final El Carrasco está ubicado al suroccidente de la ciudad de Bucaramanga, en el kilómetro 6 de la vía a Girón (Figura 2), en el barrio El Porvenir, perteneciente a la comuna 11 sur. Se localiza en una cañada natural dentro de los depósitos aluviales de la meseta de Bucaramanga y cuenta con una extensión aproximada de 93 hectáreas. En su interior se han adecuado tres cárcavas y cuatro celdas (Mora, 2019). El Carrasco recibe residuos sólidos de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Rionegro, El Playón y Matanza. No obstante, debido a decisiones judiciales que ordenan su cierre, las intervenciones e inversiones en el relleno sanitario se han visto limitadas en el corto plazo. Además de las zonas de disposición, el sitio cuenta con una planta de tratamiento de lixiviados, un parque contemplativo y una estación de clasificación y aprovechamiento de residuos (Alcaldía de Bucaramanga, 2022).

El Carrasco inició operaciones en 1978 como un basurero a cielo abierto, en una época sin normativas técnicas para la disposición de residuos. Su funcionamiento consistía en verter directamente los desechos en una cañada. Posteriormente, se convirtió en un relleno sanitario, lo que generó pasivos ambientales y contaminación en cuerpos de agua cercanos como la quebrada La Iglesia. Ante esta situación, se clausuró la cárcava 2 y se inició la operación en la cárcava 1.

Figura 2

Localización del área de estudio dentro del Relleno Sanitario "El Carrasco", en la Cárcava 1.



Durante su funcionamiento, los habitantes de zonas aledañas han reportado afectaciones por plagas y malos olores. Desde 2002 se han emprendido acciones legales buscando su cierre definitivo y la identificación de nuevas alternativas para la disposición de residuos, aunque estos procesos han enfrentado múltiples dilaciones (Pinto, 2019).

En 2016 se puso en marcha una nueva planta de tratamiento de lixiviados, con capacidad para tratar metales pesados por primera vez. La empresa Vitalogic RSU fue designada para liderar un proyecto de valorización energética de residuos, pero debido a investigaciones legales, el acuerdo no se concretó, derivando nuevamente en una declaratoria de emergencia sanitaria.

El 3 de octubre de 2018, el colapso de la celda 4 de la cárcava 2 generó un deslizamiento de 30.000 toneladas de basura. Este hecho desencadenó una orden judicial para que la EMAB, la CDMB y las alcaldías de Bucaramanga y Girón presentaran una solución definitiva para la

disposición de residuos. Sin embargo, hasta la fecha, El Carrasco continúa en funcionamiento sin que se haya definido un nuevo sitio para el relleno sanitario.

3.2 Estabilidad del relleno sanitario.

A partir del Decreto 1784 de 2017, se establece que la disposición final de residuos sólidos en Colombia debe someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental (EIA) y cumplir con requisitos específicos en todas las etapas: selección del sitio, diseño, construcción, operación, cierre y rehabilitación. Sin embargo, los parámetros geotécnicos utilizados en el país provienen en su mayoría de estudios extranjeros, lo cual no siempre es adecuado dadas las condiciones geográficas y climáticas locales. Por ello, se hace necesario desarrollar investigaciones propias para evaluar con precisión la viabilidad geotécnica de los rellenos sanitarios en cada región del país.

Palma (2006) propone una metodología para evaluar la estabilidad de un relleno sanitario basada en métodos geotécnicos tradicionales. Esta incluye el análisis de parámetros como compresibilidad, capacidad portante y estabilidad de taludes. La estabilidad global del relleno depende directamente de la calidad de la información obtenida, incluyendo características como deformaciones, parámetros resistentes, presión intersticial, densidad, geometría, tipo de residuos, método de disposición y sistemas de drenaje de biogás y lixiviados.

El monitoreo de asentamientos en rellenos sanitarios, a nivel superficial, se realiza de forma similar a terrenos tradicionales mediante mediciones topográficas con niveles, taquímetros, drones o estaciones totales. No obstante, para evaluar los asentamientos a diferentes profundidades dentro del relleno, se requieren instrumentos especializados como inclinómetros, esferas flotantes y platos telescópicos. Un estudio de Gourc et al. (2001) en Francia utilizó estos dispositivos, permitiendo

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

comparar datos superficiales e internos en un mismo perfil. Aunque esta metodología mejora la precisión del análisis, su instalación durante la operación del relleno puede comprometer su integridad.

3.3 Cárcava 1

Tras la clausura de la Cárcava 2, utilizada como vertedero a cielo abierto sin control técnico, en 1985 se habilitó la Cárcava 1 con el objetivo de mejorar la disposición de residuos. Esta zona incluyó las celdas 1 y 2, donde se depositaron aproximadamente 1.300.000 toneladas de residuos provenientes de 15 municipios en un área de 17 hectáreas. Mediante la Resolución 1328 de 2010, la CDMB ordenó su cierre definitivo a partir de marzo de 2011. Sin embargo, entre 2011 y 2016 se retomó temporalmente su uso (Díaz y Peñaranda, 2021; Torrado y Rondón, s.f.).

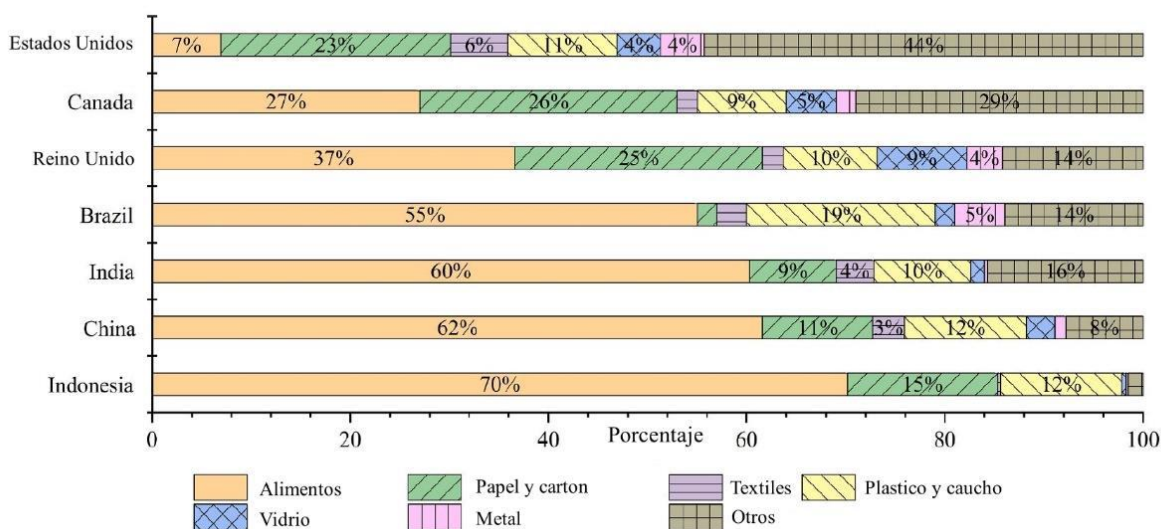
La zona analizada corresponde a la antigua celda 1, ubicada en la Cárcava 1 del relleno sanitario El Carrasco. En este sitio, los residuos se depositaban diariamente en capas de 0,5 metros, de forma escalonada, mediante la formación de terrazas y celdas. En 2011 se declaró la emergencia sanitaria, la cual fue prorrogada en los años 2012 y 2013 (Torrado y Rondón, s.f.). La celda 1, que abarca una extensión de 2,2 hectáreas y presenta una altura promedio de 5 metros, fue clausurada (Franco et al., 2018). Actualmente se encuentra en proceso de revegetalización; su estructura está compuesta por capas de residuos de 0,3 a 0,5 metros, cubiertas con geomembranas y una capa superficial de material arcilloso con vegetación. Estas capas están separadas por bermas que contribuyen a evitar la emisión de gases tóxicos y protegen al relleno de la infiltración de agua (Díaz y Peñaranda, 2021; Torrado y Rondón, s.f.).

3.4 Composición de un relleno sanitario

La composición de un relleno sanitario es diversa e incluye residuos orgánicos, papel, metales, vidrio, plástico, madera, entre otros (Figura 3). Las proporciones varían según la región, siendo común en países en desarrollo una mayor presencia de residuos orgánicos y menor cantidad de materiales reciclables (Ren et al., 2022).

Figura 3

Composición general de los rellenos sanitarios Nota. Composición de rellenos sanitarios para algunos países de referencia. Adaptado de *A review on settlement models of municipal solid waste landfills* (Ren et al., 2022).



Los rellenos sanitarios, al igual que los suelos, son materiales porosos con fases sólida, líquida y gaseosa. Sin embargo, presentan mayor complejidad debido a la heterogeneidad y anisotropía de sus partículas, además de estar sujetos a procesos físicos, químicos y de biodegradación. Estos procesos generan lixiviados, gases, calor y cambios de volumen, afectando

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

la estructura interna del relleno. Durante su vida útil, los vertederos atraviesan fases de transformación en las que los residuos sólidos se convierten en líquidos y gases, alterando los esfuerzos efectivos y provocando deformaciones (Ren et al., 2022).

En el caso específico del área metropolitana de Bucaramanga, el 88 % de los residuos sólidos corresponde principalmente a materiales de tipo orgánico. Dentro de esta categoría, los residuos de alimentos representan el 38 % y los misceláneos el 18 % del total de residuos orgánicos (EMAB, 2016).

4 Marco de referencia

4.1 Fundamentos métodos geofísicos

La caracterización del subsuelo haciendo uso de métodos geofísicos se basa en la medida indirecta de ciertas magnitudes físicas como la elasticidad de las rocas, la conductividad eléctrica, la variación de las corrientes naturales en la tierra, los tiempos de decaimiento de diferentes potenciales artificiales introducidos en el subsuelo, entre otros. Para ello se emplean instrumentos especializados y pueden ser realizadas en la superficie del terreno, dentro de pozos perforados, sobre el agua haciendo uso de embarcaciones o en el aire en aeronaves (Telford et al., 1990).

Los métodos de resistividad eléctrica consisten en aplicar una corriente al subsuelo mediante electrodos y medir el voltaje resultante en la superficie. La distribución del potencial eléctrico se ve influenciada por las características internas del terreno, como forma, tamaño y ubicación de estructuras. A partir de la relación entre voltaje (V) y corriente (I), se calcula la resistividad aparente, la cual proporciona información sobre las propiedades del subsuelo (Griffiths y Barker, 1993; Everett, 2013; Toledo Baca, 2015).

$$\Delta V = I * R \quad (1)$$

La resistencia R está definida por la resistividad (ρ), que es una característica propia del medio, y por la longitud (L) de un cilindro imaginario (trazado con relación a donde fluya la corriente eléctrica) sobre su área transversal (A_t), de forma tal que:

$$R = \rho * (L/A_t) \quad (2)$$

Así pues, la relación entre la diferencia de potencial o voltaje y la resistividad para un material cualquiera está definida como:

$$\Delta V = I * \rho * (L/A_t) \quad (3)$$

El método sísmico es ampliamente utilizado en la exploración del subsuelo por su precisión, resolución y capacidad de penetración (Telford et al., 1990). Consiste en generar ondas sísmicas mediante un impacto o carga explosiva superficial, registradas por geófonos distribuidos a distintas distancias. La velocidad de propagación de estas ondas depende de las propiedades elásticas del terreno, como el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson (Dobrin y Savit, 1960).

Las principales fuentes de información del método provienen de las ondas refractadas, que viajan a lo largo de interfaces entre capas con diferentes velocidades, y de las ondas reflejadas, que rebotan en dichas interfaces y regresan a la superficie. Este trabajo se enfoca en dos técnicas específicas: la sísmica de refracción, que mide el tiempo de llegada de las ondas refractadas para caracterizar condiciones geológicas como tipo de material, profundidad de capas, nivel freático y fracturas (ASTM, 2011), y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW).

4.1.1 Tomografías de resistividad eléctrica

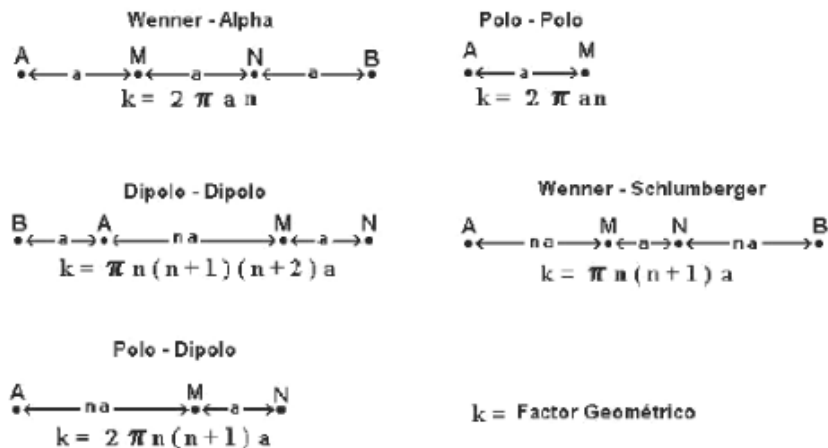
Las rocas conducen electricidad principalmente mediante tres mecanismos, conducción electrolítica (a través de iones en el agua), electrónica (por movimiento de electrones en metales) y dieléctrica (en materiales con baja conductividad). En la mayoría de los casos, la conducción en rocas se da por el agua subterránea en poros y fracturas actuando como electrolito, salvo en arcillas y minerales metálicos que pueden conducir directamente (Reynolds, 2011; Griffiths y Barker, 1993). La resistividad de las rocas varía ampliamente, desde valores muy bajos en metales como la plata hasta muy altos en sulfuros puros. Las rocas ígneas suelen tener resistividades elevadas, las sedimentarias son más conductivas por su porosidad y contenido de fluidos, y las metamórficas presentan valores intermedios. Depósitos cuaternarios y rocas volcánicas pueden mostrar resistividades bajas, entre 10 y 200 $\Omega \cdot m$ (Reynolds, 2011)

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Según Loke (2002) y Geotomo (2010), los datos de resistividad eléctrica pueden adquirirse mediante diferentes arreglos de electrodos, donde la distribución espacial influye en la medición (Figura 5). Los principales son Schlumberger, con electrodos dispuestos en línea y gran separación entre los de corriente; Wenner, con espaciado uniforme entre todos los electrodos; dipolo-dipolo, con pares de corriente y potencial cercanos entre sí, pero separados entre dipolos; y polo-dipolo, un arreglo asimétrico con un electrodo de corriente y dos de potencial más próximos entre sí. arreglo depende de los objetivos de estudio (Ontiveiros, 2003).

Figura 5

Matrices utilizadas según el arreglo de electrodos. Tomado de Loke,1999.



Entre las características que deben tenerse en cuenta se encuentran: la sensibilidad del conjunto a los cambios verticales y horizontales de la resistividad del subsuelo, la profundidad de investigación, la cobertura horizontal de los datos y la intensidad de señal (Loke,1999).

La resistividad eléctrica de las rocas, expresada en ohmios metro ($\Omega \cdot m$), depende de propiedades como porosidad, permeabilidad, tipo de fluido y contenido de iones disueltos. El

principal factor que genera contrastes de resistividad dentro de una misma roca es el fluido presente en los poros. Estas variaciones permiten identificar anomalías, como fracturas, debido a su mayor porosidad y presencia de fluidos con alta conductividad (Telford et al., 1990).

4.1.2 Exploración sísmica

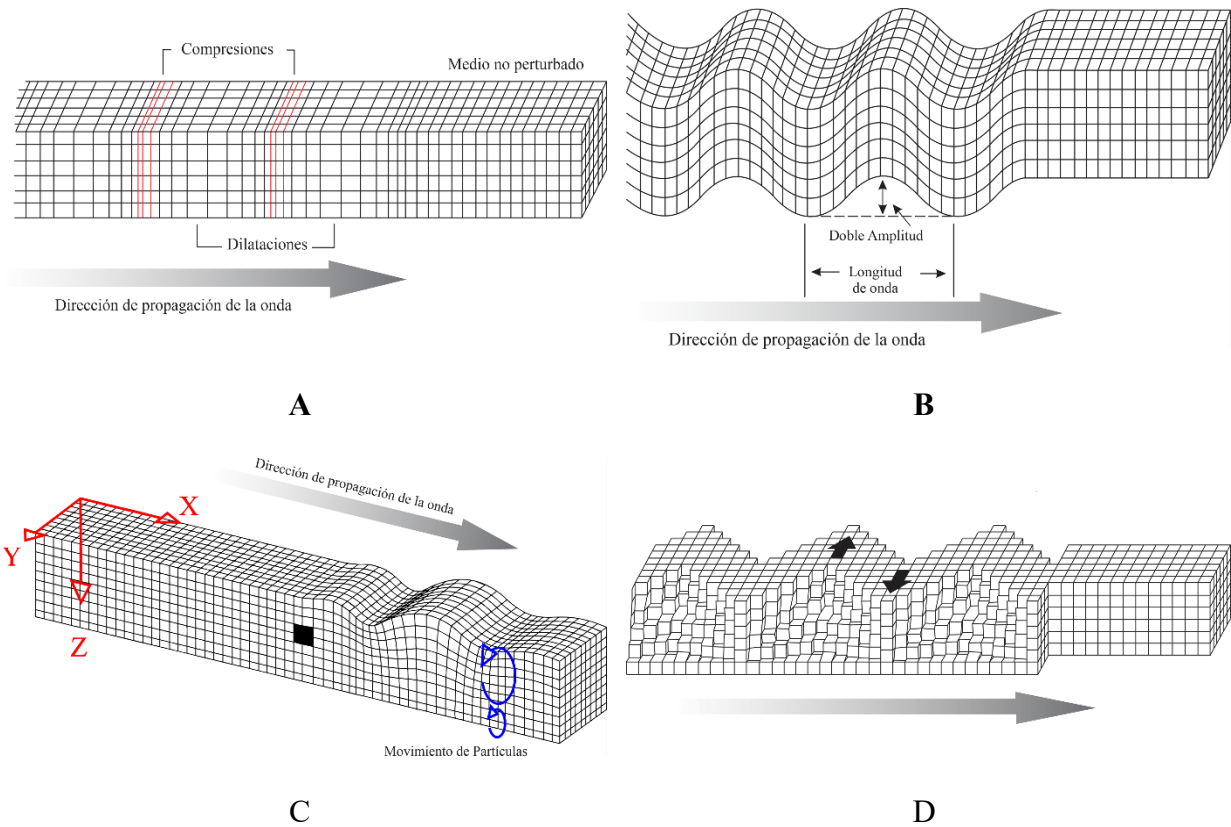
La exploración sísmica somera consiste en generar ondas sísmicas en la superficie que se propagan por el subsuelo y regresan tras reflejarse o refractarse en discontinuidades internas. Su propagación depende de las propiedades geomecánicas del terreno, en especial de los contrastes de velocidad y densidad de los materiales (Lowrie, 2007; Lazcano, 2007).

Se consideran dos tipos principales de ondas: ondas de cuerpo (primarias y secundarias) y ondas de superficie (Figura 6). La mayor parte de la energía se propaga como ondas Rayleigh (67 %), seguidas por ondas S (27 %) y ondas P (7 %) (Woods, 1968). Las ondas primarias o P, son las primeras en registrarse, viajan más rápido que las ondas S y producen un movimiento de compresión y dilatación en la dirección de propagación (Lazcano, 2007).

La sísmica de refracción mide el tiempo que tardan en propagarse las ondas elásticas refractadas desde una fuente hasta distintos puntos de observación (Figura 7). La velocidad de estas ondas está relacionada con las propiedades mecánicas del subsuelo, lo que permite caracterizar el tipo de material (suelo o roca), profundidad de capas, nivel freático, litología, estructura y fracturas (ASTM, 2011).

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

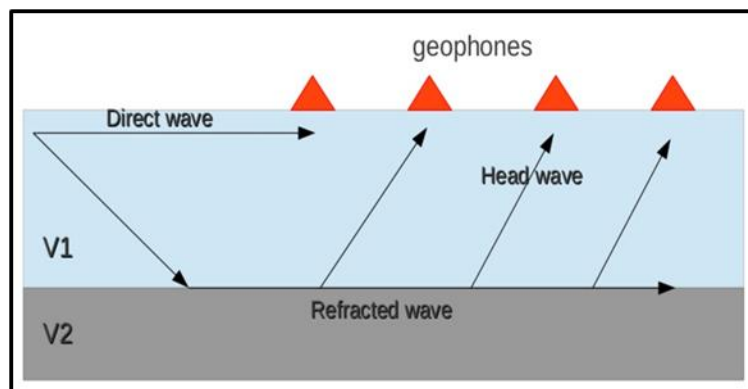
Figura 6 Esquema de propagación de las ondas en la exploración sísmica



Nota: Esquema de propagación de las A) ondas P, B) ondas S, C) ondas Rayleigh y D) ondas Love. Fuente: Adaptado de Lowrie, 2007.

Figura 7

Diagrama que muestra trayectorias de los rayos de onda directa, onda refractada y el frente de onda en un modelo de dos capas.



Cuando una capa superficial de velocidad v_0 cubre una capa más rápida v_1 , las ondas refractadas se generan a partir de un ángulo crítico y se propagan a lo largo de la interfaz. El análisis de los tiempos de arribo registrados por los geófonos permite determinar los cambios de pendiente entre ondas directas y refractadas, lo que facilita calcular las velocidades sísmicas de las capas. La sísmica de refracción proporciona la velocidad de onda compresional (onda P), útil para estimar las propiedades del subsuelo, aunque estas velocidades varían según el tipo de material geológico (ASTM, 2011; Stein y Wysession, 2009).

Las leyes que rigen la propagación y la trayectoria de las ondas sísmicas en la refracción son las mismas que se utilizan en óptica (Lowrie, 2007):

- Principio de Huygens.
- Principio de Fermat
- Ley de refracción (o de Snell)

El estudio de las ondas refractadas se fundamenta en la Ley de Snell que establece que la relación entre el seno del ángulo de incidencia y el ángulo de refracción es igual a la relación de las velocidades de fase en los dos medios de comunicación (Lowrie, 2007):

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2}. \quad (4)$$

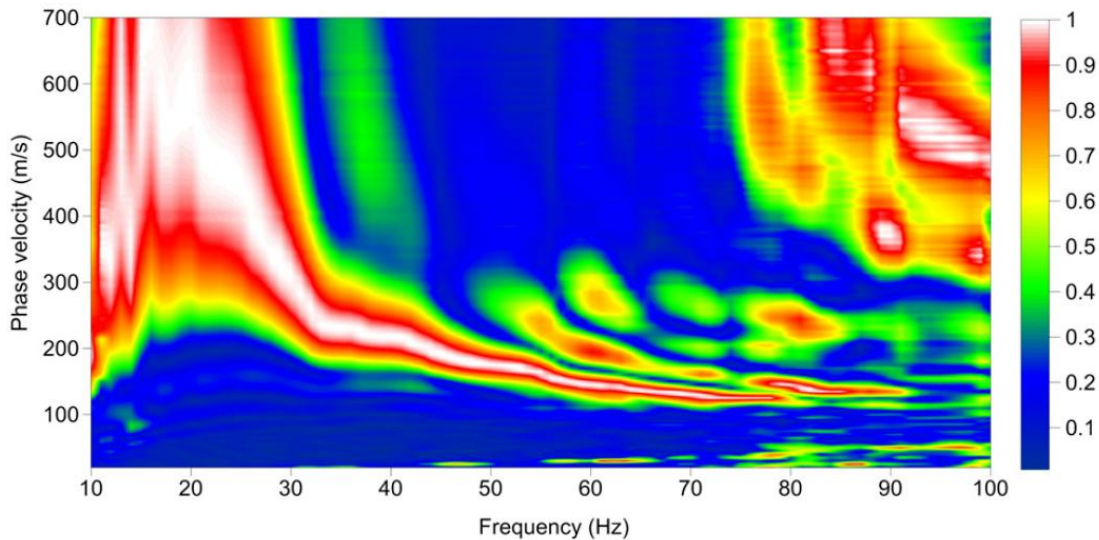
Cuando una onda sísmica incide en una capa subyacente más densa (con velocidad $V_2 > V_1$), se produce una refracción crítica a lo largo de la interfaz, generando un frente de onda que, a cierta distancia, llega a los geófonos antes que la onda directa. Este principio permite calcular las velocidades de ondas P y S a partir de los tiempos de llegada registrados, graficando el tiempo frente a la distancia entre sensores. Las pendientes de estas líneas representan la lentitud (inversa de la velocidad) y permiten identificar capas sucesivas con mayor velocidad a mayor profundidad. Sin embargo, la sísmica de refracción solo detecta capas con velocidades crecientes y puede resultar confusa en terrenos geológicamente complejos. Por ello, se recomienda registrar desde los

extremos y puntos intermedios de la línea para obtener una imagen más detallada, complementando con otros métodos como el análisis de dispersión de ondas superficiales, que ofrece múltiples modelos posibles (Lowrie, 2007).

El método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) permite estimar la velocidad de onda S a partir de ondas Rayleigh de baja frecuencia (3–30 Hz), aprovechando su comportamiento dispersivo en medios estratificados (Figura 8). Es ampliamente utilizado en la caracterización de pavimentos, estudios del coeficiente de Poisson, mapeo de fallas, detección de disoluciones y análisis de velocidad S con la profundidad. También se emplea junto a la sismica de refracción para calcular módulos de elasticidad dinámicos del terreno. Utiliza fuentes sísmicas convencionales y geófonos de alta sensibilidad, y su adquisición se basa en la configuración tipo Common Mid Point (CMP) de la sismica de reflexión (Park et al., 1999; 2007).

Figura 8

Ejemplo de curva de dispersión. Tomado de Xia (2014)



La curva de dispersión, que representa la velocidad de fase en función de la frecuencia, es fundamental para estimar la velocidad de onda S, ya que constituye la base del proceso de inversión (Park et al., 1999). A partir de esta curva, se realiza un proceso iterativo que incorpora datos de dispersión, densidad estimada y el coeficiente de Poisson, generando una curva de dispersión teórica. Los perfiles de velocidad S en 2D se construyen interpolando modelos 1D obtenidos con

un arreglo de receptores fijos, donde se realizan disparos sucesivos entre los geófonos a lo largo de toda la línea de adquisición (Park, 2005; Geometrics, 2009).

4.2 Marco geotécnico

La caracterización geotécnica permite determinar la estabilidad de laderas, estos estudios se llevan normalmente a cabo mediante la exploración directa del subsuelo por medio de apiques, perforaciones, pruebas de campo, entre otros, y en ocasiones también se realizan posteriores ensayos de laboratorio. Aun así, esto implica un costo y tiempo que puede dificultar la ejecución de un proyecto. Los métodos de exploración sísmica correspondientes a refracción, análisis de onda superficial permiten la caracterización geotécnica indirecta del subsuelo a través del cálculo de parámetros geotécnicos. Este cálculo se realiza considerando las relaciones de las velocidades de onda P y velocidad de onda S y propiedades físicas de los materiales. En el caso de los métodos geoelectrónicos como lo son las tomografías de resistividad eléctrica, permiten identificar áreas saturadas o presencia de material arcilloso (Khalil y Hanafy, 2008).

4.2.1 Parámetros geotécnicos o geomecánicos

Estos parámetros, también denominadas constantes elásticas, permiten caracterizar el comportamiento del suelo, las cuales tienen concordancia con la densidad de los materiales propios del sitio estudiado y con la velocidad de las ondas sísmicas de cada material.

La relación de Poisson (η) es una constante elástica que describe la relación entre la deformación transversal (E_{yy}) y la deformación longitudinal (E_{xx}). Cuando un cuerpo se somete a compresión, se acorta en una dirección y se expande en la dirección perpendicular; en cambio, bajo tracción, se alarga longitudinalmente y se contrae transversalmente. En suelos, el valor típico de esta constante es de 0.3 en condiciones drenadas y de 0.5 en condiciones no drenadas. Diversos autores han reportado que η puede variar desde valores cercanos a cero en suelos blandos hasta aproximadamente 0.5 en suelos densos y estructurados (Mullins et al., 1990; Gazetas, 1991; Raper et al., 1994; Nelson et al., 1997; Luna y Jadi, 2000; Briaud, 2001; García, 2014).

Este parámetro refleja la maleabilidad de los materiales geológicos, siendo generalmente mayor en materiales rígidos que en materiales blandos (Smith, 1982). Su valor varía entre 0 (sin contracción lateral) y un máximo de 0.5, correspondiente a un fluido incompresible. Por ejemplo,

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

en rocas muy rígidas como el granito, η puede alcanzar valores de 0.4, mientras que en sedimentos poco consolidados puede descender hasta 0.1 (Lowrie y Fichtner, 2019).

El coeficiente de Poisson se puede determinarse a partir de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas P (V_p) y S (V_s), como se describe en Sheehan et al. (2004) mediante la fórmula:

$$\eta = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}. \quad (5)$$

El módulo de Young representa la deformación longitudinal que experimenta un material bajo una tensión uniaxial (Lowrie y Fichtner, 2019). Este parámetro se utiliza comúnmente para predecir el estiramiento o compresión de un objeto, siempre que la carga aplicada no supere el límite elástico del material. En geotecnia, se interpreta como la tendencia del suelo a deformarse axialmente bajo cargas aplicadas. Es uno de los parámetros elásticos más empleados en estudios geotécnicos, ya que permite estimar asentamientos, alargamientos y deformaciones elásticas producidas por cargas estáticas (García, 2014).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (6)$$

En función de las velocidades de onda P (V_p) y onda S (V_s), el módulo de Young puede expresarse mediante la fórmula (Naranjo Aguay y Dranichnikov, 2013):

$$E = \delta V_s^2 \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right). \quad (7)$$

donde δ es la densidad del material del terreno.

El módulo de rigidez o de cizallamiento (μ o G), es una constante elástica que describe el cambio de forma que experimenta un material cuando se le aplican esfuerzos cortantes o tensiones paralelas a su superficie, lo cual genera una deformación angular. Esta deformación se representa por el ángulo que se forma entre la superficie original y la superficie desplazada por la tensión aplicada (Naranjo Aguay y Dranichnikov, 2013). El cizallamiento está asociado a la tendencia del

material a fracturarse o desplazarse bruscamente, como ocurre en un deslizamiento de tierra (García, 2014).

$$\sigma_{xy} = 2\mu\varepsilon_{xx}\sigma_{yy} = 2\mu\varepsilon_{yy}\sigma_{zz} = 2\mu\varepsilon_{zz} \quad (8)$$

Donde la constante de proporcionalidad μ corresponde al módulo de rigidez (también denominado G) (Lowrie y Fichtner, 2019). Este módulo puede expresarse en función de la velocidad de onda S (V_s), como se muestra en la fórmula (Naranjo Aguay y Dranichnikov, 2013):

$$G = \frac{E}{2(1 + \eta)} = \delta V_s \quad (8)$$

donde δ es la densidad del material del terreno y η el Coeficiente de Poisson.

Los modelamientos utilizados para describir los fenómenos físicos durante un deslizamiento se basan en las teorías de la resistencia de materiales. En estos eventos, rocas y suelos fallan siguiendo los principios de fricción y cohesión, descritos por la ecuación de Coulomb (Suárez, 2009).

$$\tau = c' + (\sigma - \mu)\text{Tan}\phi' \quad (9)$$

En esta ecuación, τ representa el esfuerzo cortante resistente, C' la cohesión o cementación efectiva, σ el esfuerzo normal total, y μ la presión de poros o presión del agua intersticial. Para aplicar el análisis de Coulomb, es necesario conocer dos parámetros fundamentales: el ángulo de fricción interna y la cohesión, considerados propiedades intrínsecas del suelo.

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física.

$$F_r = \text{Tan}\phi \quad (10)$$

Para obtener el ángulo de fricción de suelos granulares según la información de sísmica de refracción se han propuesto algunos métodos. En suelos saprolíticos, el ángulo de fricción interna se puede calcular usando las siguientes formulas.

$$\phi = 46.4 - 9.65 \frac{V_p}{V_s} \quad (11)$$

$$\phi = \frac{9.17}{\sqrt{\frac{V_P}{V_S} - 1.41}} \quad (12)$$

4.2.2 *Mecanismos de asentamiento*

La compresión primaria o mecánica, también conocida como asentamiento primario, se produce por la reorientación y el desplazamiento de las partículas, así como por el colapso de los espacios vacíos debido al peso propio de los residuos (Sivakumar et al., 2010). Según diversos autores, como Rivera (2012), este proceso ocurre poco tiempo después de finalizado el llenado, generalmente entre diez y noventa días. La magnitud y velocidad de la compresión primaria dependen de factores como el tipo de desechos, la geometría del relleno, su densidad y el método de operación empleado.

La biodegradación es un proceso resultado de la actividad bacteriana, tanto en condiciones aerobias como anaerobias, siendo la descomposición de la celulosa en ausencia de oxígeno el principal mecanismo involucrado. Durante este proceso, las bacterias transforman los materiales sólidos con base de carbono y agua en dióxido de carbono y metano (Rivera, 2012).

La compresión por flujo plástico ocurre como resultado de varios procesos. En primer lugar, la erosión y el transporte de partículas finas hacia los vacíos entre partículas más grandes; en segundo lugar, el llenado de esos vacíos por productos derivados de la biodegradación; y, finalmente, los efectos posteriores a la compresión elástica. Estos fenómenos contribuyen al debilitamiento parcial de la capacidad de soporte del material de relleno, principalmente debido al progresivo llenado de vacíos causado por procesos como la corrosión y la biodegradación (Rivera, 2012).

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

El fenómeno físico-químico como mecanismo de asentamiento se origina a partir de procesos como la degradación de materiales orgánicos, así como la corrosión, oxidación y descomposición de compuestos inorgánicos presentes en el relleno sanitario (Rivera, 2012).

El mecanismo de interacción depende de la presencia de oxígeno y de otros procesos de asentamiento, ya que por sí solo no genera asentamientos significativos. No obstante, puede presentarse en zonas localizadas dentro de asentamientos de gran magnitud. Este fenómeno involucra interacciones como la del metano con procesos de combustión, así como la acción de ácidos orgánicos y combustión espontánea, que pueden provocar corrosión en el material de relleno (Rivera, 2012).

La consolidación es un mecanismo de asentamiento que ocurre por la expulsión de líquidos del suelo. Cuando se incrementa la presión de poros, parte del contenido líquido se libera, lo que provoca una reducción del volumen y, en consecuencia, una densificación del material del relleno (Rivera, 2012).

4.2.3 Etapas de asentamiento

Los asentamientos en los rellenos sanitarios se desarrollan en cinco etapas a lo largo del tiempo (Figura 9). A continuación, se describen brevemente:

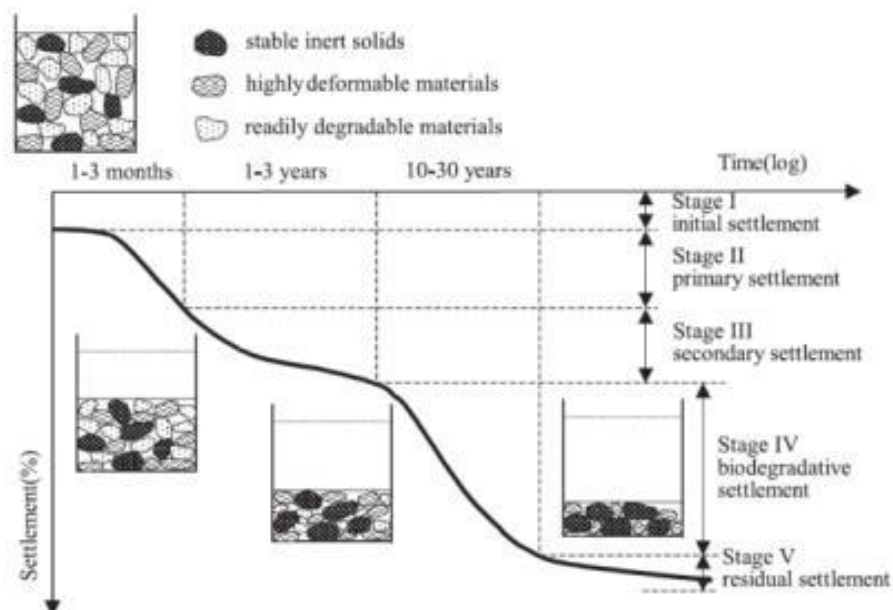
- Asentamiento inicial: se debe principalmente a la compresión física causada por el peso propio de los residuos o por la aplicación de una carga externa. En esta fase se produce un reacomodamiento de partículas y una reducción de los vacíos dentro del relleno (Yepes y Villarraga, 2018).
- Asentamiento primario: se caracteriza por su comportamiento no uniforme, ya que las partículas finas comienzan a ocupar los espacios vacíos entre las partículas más grandes (Rivera, 2012).

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

- Asentamiento secundario: también conocido como asentamiento por creep, se produce bajo la acción de cargas constantes en el tiempo (Yepes, 2015).
- Asentamiento por biodegradación: resultado de la descomposición de los componentes orgánicos contenidos en el relleno sanitario (Rivera, 2012).
- Asentamiento residual: asociado a procesos físico-químicos, como la degradación de materiales inorgánicos, corrosión y oxidación (Rivera, 2012).

Figura 9

Etapas de asentamientos en el tiempo. Tomado de *Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios* (Rivera, 2012).



4.3 Modelos de asentamiento

Los asentamientos del terreno en rellenos sanitarios pueden alcanzar entre el 10% y el 50% de la altura inicial del relleno (Sowers, 1975; Edgers et al., 1992; Wall & Zeiss, 1995; El-Fadel et al., 1999). En respuesta a este comportamiento, se han desarrollado diversos modelos teóricos y empíricos que buscan representar la evolución de los asentamientos a lo largo del tiempo. A

continuación, se profundiza en tres enfoques específicos que han sido ampliamente utilizados en la literatura y que permiten caracterizar distintos mecanismos de deformación en rellenos con condiciones geotécnicas variables.

4.3.1 Modelo Hiperbólico

El modelo hiperbólico, de naturaleza empírica, fue introducido por Ling et al. (1998) y ha sido utilizado en diversos estudios, tales como los de Simões y Catapreta (2013), Park et al. (2007) y Ordóñez (2007). Este modelo es relevante debido a su capacidad para representar la evolución temporal de los asentamientos, así como por facilitar comparaciones directas con los resultados obtenidos (Yepes, 2015). Su formulación se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$s(t) = \frac{t}{\frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{s_{ult}}} \quad (13)$$

Donde $s(t)$ es el asentamiento en un instante t , ρ_0 es la tasa inicial de asentamiento en unidades de longitud/tiempo y s_{ult} es el asentamiento último.

Con lecturas tomadas en campo o laboratorio la expresión puede ser reescrita como una regresión lineal en función de t y $s(t)$, donde ρ_0 y s_{ult} se obtienen como los inversos del intercepto y la pendiente.

$$\frac{t}{s(t)} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{s_{ult}} \quad (14)$$

4.3.2 Modelo Exponencial

El modelo exponencial, también conocido como modelo reológico, fue propuesto por Gibson y Lo (1961) y ha sido aplicado al estudio de asentamientos en residuos sólidos por diversos autores, entre ellos Edil et al. (1990), El-Fadel et al. (1999) y Simões y Catapreta (2013). Este

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

modelo incorpora simultáneamente los efectos de asentamientos primarios y secundarios, lo que lo hace particularmente útil para describir el comportamiento deformacional de materiales con consolidación prolongada. Desde el punto de vista mecánico, el modelo está conformado por un elemento elástico de tipo Hookeano conectado en serie con una unidad de tipo Kelvin, la cual se representa mediante dos elementos en paralelo: uno resistente con constante de proporcionalidad b , y otro con amortiguamiento Newtoniano de fluidez lineal λ/b (Yepes, 2015).

La aplicación de una carga vertical ya sea por el propio peso de los residuos o por cargas externas, genera una compresión inmediata en el primer elemento Hookeano, en un comportamiento análogo al de la consolidación primaria en suelos. En la unidad Kelvin, el componente viscoso (amortiguador) introduce un retardo en la transferencia de carga hacia el segundo elemento elástico, lo que representa el efecto de los asentamientos secundarios. Sin embargo, con el transcurso del tiempo, la carga termina siendo soportada íntegramente por los dos elementos Hookeanos (Yepes, 2015). Al aplicar la ecuación de equilibrio al sistema reológico, se obtiene la siguiente expresión:

$$s(t) = H \cdot \Delta\sigma \cdot \left[a + b \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda}{b} t\right) \right] \right] \quad (15)$$

donde $s(t)$ es el asentamiento en metros para un tiempo dado, $\Delta\sigma$ corresponde al incremento del esfuerzo vertical en kPa , a es el parámetro de compresión primaria en kPa^{-1} , b es el parámetro de compresión secundaria en kPa^{-1} , λ es la tasa de compresión secundaria en $día^{-1}$, H es la altura inicial de la capa de residuos en metros.

4.3.3 Modelo de Marques et al. (2003)

Este modelo integra tres mecanismos de asentamiento, representados mediante tres sistemas reológicos conectados en serie, basados en las propuestas de Gibson y Lo (1961) y Park

y Lee (1997). La compresión instantánea y la deformación mecánica inducida por cargas aplicadas o por el peso propio de los residuos se modelan de manera análoga al enfoque exponencial. Por otro lado, el efecto asociado a la descomposición biológica se representa mediante un sistema compuesto por un elemento de compresión finita en paralelo con un componente viscoso de tipo Newtoniano, caracterizado por una fluidez lineal (Yepes, 2015). Este sistema se describe mediante la siguiente formulación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} = C'_c \cdot \log\left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}\right) + \Delta\sigma \cdot b(1 - e^{-c \cdot t'}) + E_{DG} \cdot (1 - e^{-d \cdot t''}) \quad (16)$$

donde ε es la deformación en porcentaje, H es la altura de la capa de residuos en metros, ΔH es la diferencia de altura de la capa de residuos en metros, C'_c es el módulo de compresión primaria, σ_0 es el esfuerzo vertical inicial en kPa, $\Delta\sigma$ es el cambio en el esfuerzo vertical en kPa, b es el coeficiente de compresión secundaria creep en kPa^{-1} , c es la tasa de compresión secundaria creep en $día^{-1}$, E_{DG} representa el potencial de deformación total debida a la biodegradación, d es la tasa de biodegradación $día^{-1}$, t'' es el tiempo transcurrido desde la disposición de los residuos en día y t' es el tiempo transcurrido desde la aplicación del incremento de carga en días.

4.3.4 Teoría de consolidación de Zeevaert (1984)

En la mecánica clásica de suelos, la consolidación de arcillas se divide en dos etapas: una fase inicial de deformaciones elasto-plásticas asociadas a la expulsión de agua y disipación de presiones intersticiales, seguida por deformaciones plástico-viscosas debidas al acomodamiento interno de las partículas, cuya magnitud disminuye con el tiempo. Zeevaert representa estas etapas mediante dos modelos reológicos conectados en serie: la Unidad Kelvin y la Unidad Z. El modelo se basa en dos estructuras del suelo: una compuesta por granos microscópicos sin cohesión

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

(responsables de la compresión primaria) y otra por flóculos submicroscópicos de minerales arcillosos, que generan una respuesta viscosa intergranular asociada a la compresión secundaria (Yepes, 2015).

En el modelo físico de Zeevaert, un incremento de carga unitaria (Δp) genera una deformación volumétrica total compuesta por las deformaciones de la estructura primaria ($\Delta \varepsilon^1$) y secundaria ($\Delta \varepsilon^2$). La unidad Kelvin se modela con dos elementos en paralelo: un componente elástico con módulo de compresibilidad m_v y un amortiguador Newtoniano con fluidez lineal ϕ_1 . Por su parte, la unidad Z también consta de dos elementos en paralelo: uno de fluidez no lineal $\frac{a}{b+t}$, que representa la fluidez intergranular decreciente en el tiempo, y otro con fluidez lineal ϕ_2 , que modera el movimiento del componente viscoso no lineal. La ecuación de equilibrio se expresa como:

$$\frac{\Delta \varepsilon_v}{m_v \Delta p} = F(T_v) + \beta \log(1 + \xi T_v) \quad (17)$$

Donde m_v es el coeficiente de compresibilidad volumétrica unitario para la compresión primaria, c_v es el coeficiente de consolidación del fenómeno primario, β es el factor que mide la magnitud relativa del fenómeno viscoso intergranular, y ξ es el factor adimensional que modifica el valor $T_v = c_v t / H^2$.

4.3.5 *Modelo lineal viscoso*

El modelo lineal viscoso utilizado en CODE BRIGHT (Code Bright, 2023) es una formulación que representa el comportamiento de materiales que experimentan deformación progresiva y continua bajo una carga constante, un fenómeno conocido como creep. En este modelo, la tasa de deformación es directamente proporcional al esfuerzo aplicado y no existe

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

recuperación una vez retirada la carga, lo que implica una deformación permanente. Esta formulación se ha aplicado para describir el comportamiento de suelos blandos y materiales como la sal bajo condiciones de saturación, como es el caso del mecanismo FADT (Fluid Assisted Diffusional Transfer). En las cuales se considera las condiciones húmedas, el papel de la presión de poro y el grado de saturación en el proceso deformacional.

Tasa de deformación del modelo:

$$\frac{d\varepsilon^{FADT}}{dt} = \frac{1}{2\eta_{FADT}^d} (\sigma' - p'I) + \frac{1}{3\eta_{FADT}^v} p'I$$

Donde:

σ' : Tensor de esfuerzos efectivos, definido como $\sigma' = \sigma + P_f$, siendo $P_f = \max(P_g, P_l)$.

p' : Presión media efectiva, $p' = p + P_f$.

I : Tensor identidad.

Viscosidades volumétrica y desviadora, respectivamente:

$$\frac{1}{\eta_{FADT}^v} = \frac{16B(T)\sqrt{S_l}}{d_0^3} g_{FADT}^v(e)$$
$$\frac{1}{2\eta_{FADT}^d} = \frac{16B(T)\sqrt{S_l}}{d_0^3} g_{FADT}^d(e)$$

Donde $g_{FADT}^d(e)$ y $g_{FADT}^v(e)$ son funciones no lineales internas del modelo, dependientes de la relación de vacíos (e), y S_l es el grado de saturación.

$$B(T) = \frac{A_B}{RT} \exp\left(\frac{-Q_B}{RT}\right)$$
$$g_{FADT}^v(e) = \frac{3g^2 e^{3/2}}{(1+e)}$$

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

$$g_{FADT}^d(e) = \frac{g^2}{(1+e)}$$

$$g = \frac{1}{(1-f)^2}$$

$$f = \sqrt{\frac{2e}{3(1-e^{3/2})(1+e)}}$$

5 Metodología

Con el fin de definir el rumbo y localización del perfil a estudiar en el Carrasco, se realizaron campañas de pre-campo donde se evaluó el estado del terreno y se recorrió el área para conocer las actividades que se desarrollan; el perfil de interés se realizó en la parte central de la celda (Figura 10).

Figura 10

Localización del perfil geofísico general en el área de estudio. Se localizan las



5.1 Geofísica en campo

5.1.1 Adquisición Geoeléctrica

El montaje de la geo-eléctrica fue sobre el mismo perfil de la línea sísmica, se utilizó el resistivímetro Terrameter LS (Figura 11), manufacturado por Guideline-GEO ABEM de Suecia, empleando 2 cables multi-electródicos de espaciado de 5 metros, 41 electrodos de acero inoxidable, 42 conectores tipo Jumper para la conexión electrodocable, 2 porras de 3 libras, y una batería externa de 12 voltios.

Figura 11

Terrameter LS y accesorios para la adquisición de geo-eléctrica en el Carrasco.



Para garantizar el mismo punto central entre el perfil sísmico y geoeléctricos se procedió a ubicar el punto central de interés y desde este punto se procedió con extensión de la cinta métrica a lo largo del perfil de interés ubicando a un intervalo de cada 2.5 metros los electrodos, posteriormente se extienden los cables multi-electródicos y se conectan los electrodos con los jumpers, en el punto central se ubicó la consola y se procede a conectar con los cables. Realizado el montaje de la línea geo-eléctrica, se procedió a configurar los parámetros de adquisición para medir la resistividad aparente del subsuelo, iniciando con una prueba inicial de contacto entre los

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

electrodos y el terreno. Establecidos los parámetros se inició la medición con los arreglos Gradiente y Dipolo-Dipolo.

5.1.2 Adquisición sísmica

La adquisición sísmica en el Carrasco se utilizó un sismógrafo GEA24 de la empresa PASI, empleando 24 geófonos verticales de 4.5 Hz, 2 cables sísmicos espaciado estándar 5 metros, geófono starter, plato de impacto, una maza de impacto de 16 libras y radios de comunicación (Figura 12).

Figura 12

Sismógrafo GEA24 y accesorios para la adquisición sísmica en el Carrasco empleados.



El proceder para realizar la adquisición inició con la extensión de la cinta métrica tomando el punto central de referencia, extendida la cinta métrica se ubicaron los geófonos a un espaciado de 4 metros, posteriormente se extienden los cables sísmicos y se conectan los geófonos, en el punto central se ubicó la consola y se procede a conectar con los cables. Realizado el montaje de la línea sísmica, se procedió a configurar los parámetros de adquisición y realizar unas pruebas para ver la calidad señal-ruido de la zona. Establecidos los parámetros se inició el registro de los disparos cada 4 metros iniciando -2 metros antes del primer geófono, cada disparo constó de un stack de 10 golpes.

5.2 Procesamiento perfiles geofísicos

A continuación, se sintetiza el flujo de procesamiento para los datos de tomografía de resistividad eléctrica, sísmica de refracción y MASW 2D, correspondientes a la adquisición realizada en campo el día 8 de marzo de 2022.

5.2.1 Procesamiento Tomografías de Resistividad Eléctrica

El procesamiento para la TRE con arreglo de Gradiente siguió los siguientes pasos, los cuales se replicaron también para el arreglo Dipolo-Dipolo. Se comenzó cargando el proyecto en el software Terrameter Toolbox para exportar los archivos con extensión .DAT, los cuales serían leídos por el software Res2dinv. En este punto, se revisó la geometría y los parámetros de adquisición, además de realizar un filtrado previo de los valores de resistividad que no tuvieran sentido físico o mostraran dispersión excesiva.

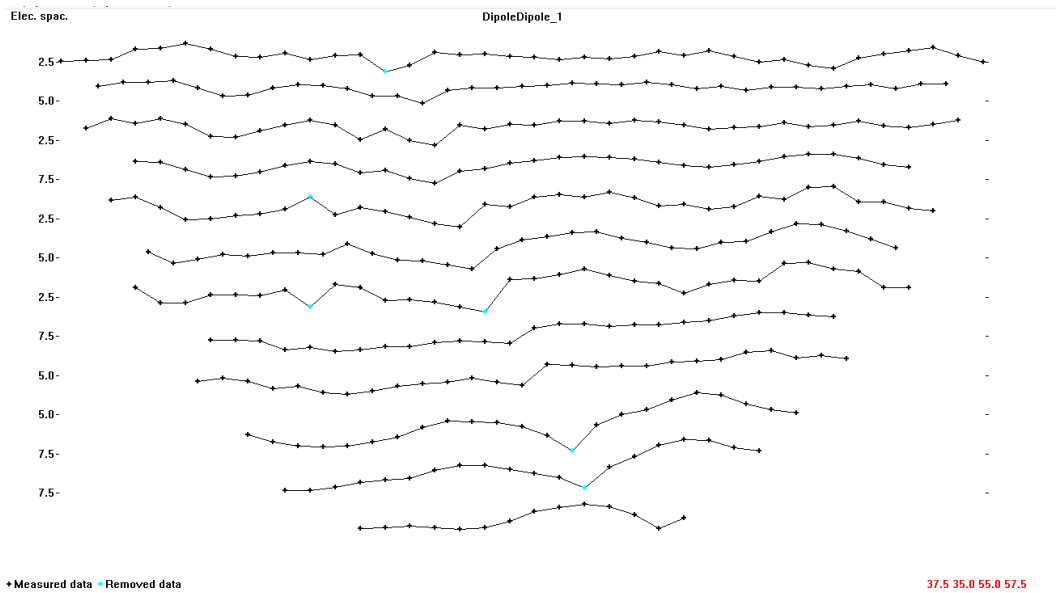
Los datos .DAT preprocesados se cargaron en Res2dinv, donde se revisó el comportamiento de las resistividades aparentes obtenidas durante la adquisición. Se filtraron los valores de resistividad que no siguieran la tendencia esperada para cada nivel de profundidad, buscando mantener una tendencia lineal en los valores de resistividad eléctrica (Figura 13).

A continuación, se configuraron los parámetros de modelado e inversión para realizar la primera inversión. El error RMS inicial se redujo mediante un filtrado de aquellos valores con un error RMS muy alto, utilizando un crossplot entre los valores medidos y calculados, así como el histograma de frecuencias, considerando la dispersión de los datos (Figura 14). Finalmente, se realizó una última inversión, en la que se incluyó la topografía del terreno (Figura 15).

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 13

Filtrado de valores de resistividad que no conservan una tendencia en cada nivel (puntos de color celeste) para el arreglo Dipolo-Dipolo.



Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 14

Histograma y crossplot del error RMS para el arreglo Dipolo-Dipolo, donde se procede a eliminar valores que están por fuera de la tendencia de dispersión (puntos de color rojo).

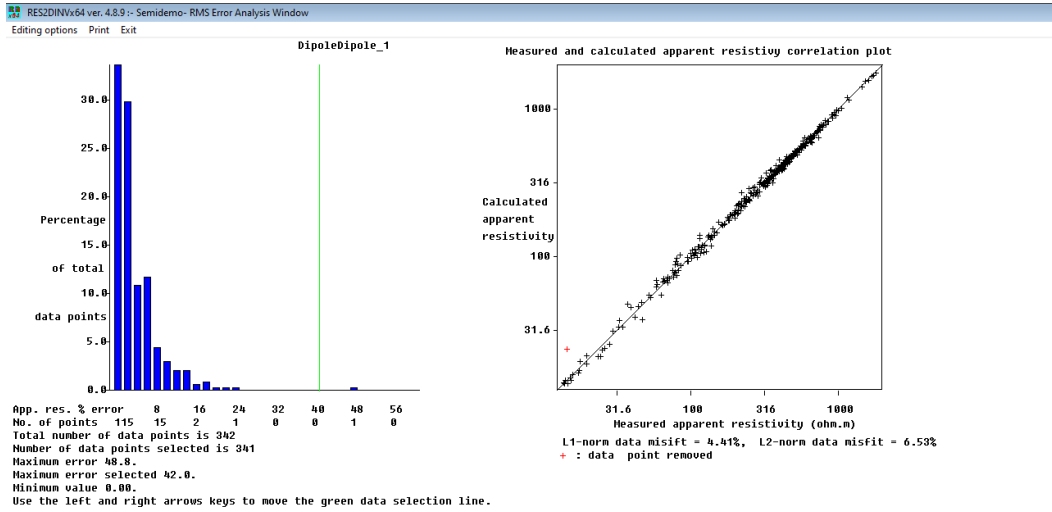
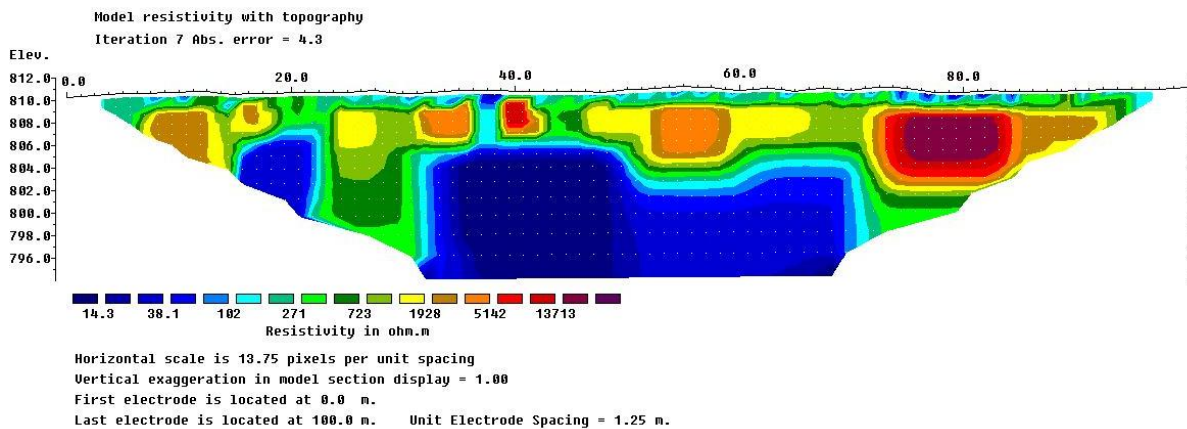


Figura 15

Modelo final del proceso de inversión para el arreglo Dipolo-Dipolo considerando la topografía.



5.2.2 *Procesamiento Sísmico de Refracción*

Se verificó en el software Pickwin que las coordenadas de disparo coincidieran con las posiciones indicadas, así como la correcta separación entre los sensores sísmicos. Además, se revisó el tiempo de registro de las refracciones críticas, las cuales generalmente presentan una amplitud menor en comparación con las ondas de superficie.

Posteriormente, se evaluó el comportamiento de las señales registradas por cada sensor, aplicando filtrados de ruido cuando fue necesario. Se realizó el picado de los primeros arribos para los 24 canales a lo largo de la línea sísmica. Estos arribos se visualizaron mediante la gráfica de dromocronas, donde se representa el tiempo de llegada frente a la distancia, facilitando la identificación de los eventos sísmicos.

Con base en los cambios de pendiente observados en las dromocronas, se asignaron las capas del modelo inicial y se realizó una primera inversión por mínimos cuadrados para estimar un modelo preliminar de las velocidades de onda P (Figura 16). Finalmente, a partir de este modelo inicial (Figura 17), se ejecutó una inversión más robusta utilizando la técnica de Tomografía Sísmica, con la cual se obtuvo el modelo final del subsuelo.

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 16

Dromocronas donde se evidencian los cambios de pendiente y se procede a la asignación de las capas para posterior generación de modelo inicial y ser usado para la tomografía sísmica

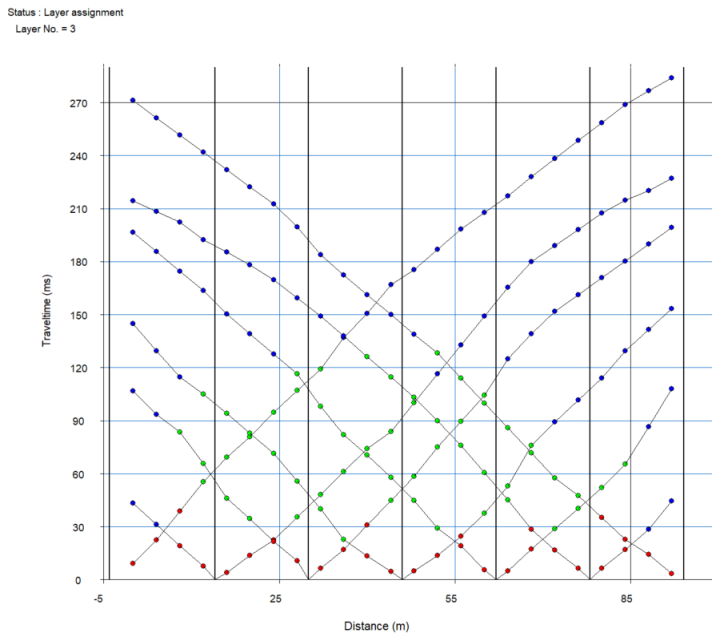
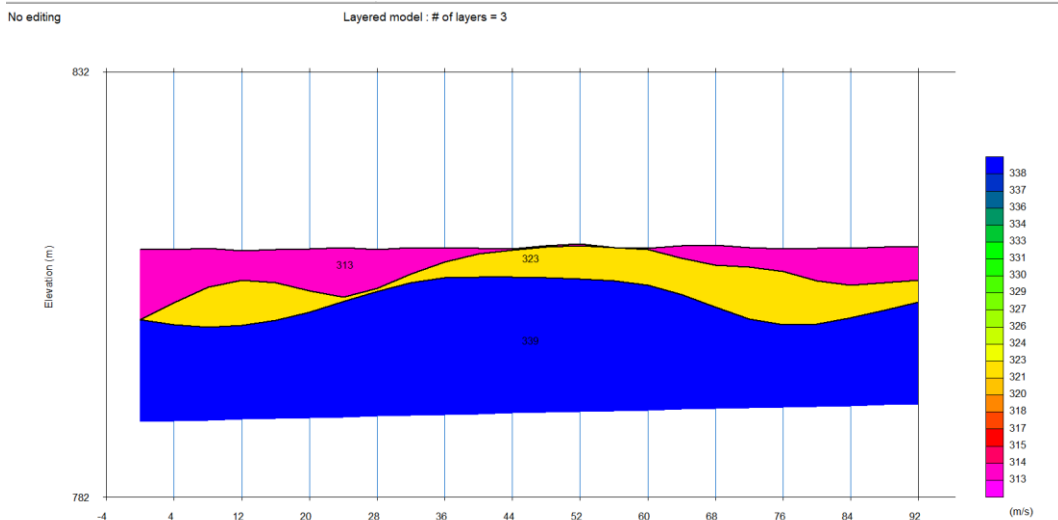


Figura 17

Modelo inicial simple considerado para la generación de la tomografía sísmica. Tanto el modelo inicial como la tomografía sísmica consideran el principio de que la velocidad aumenta en profundidad.



5.2.3 *Procesamiento MASW*

Se replicaron los dos primeros pasos del procesamiento utilizado en la sismica de refracción. Posteriormente, se cargaron todos los registros en el software Surface Wave Analysis Wizard, verificando que las posiciones de los sensores y disparos fueran correctas (Figura 18).

A continuación, se analizó el comportamiento de los datos en el dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier. Para cada una de las trazas, se ajustaron las curvas de dispersión asociadas a las frecuencias bajas. Una vez filtradas las frecuencias, se evaluó la relación señal/ruido del conjunto de curvas de dispersión, y, si fue necesario, se aplicaron filtrados adicionales a los datos previamente picados (Figura 11).

Luego, se procedió con la inversión de los datos. El modelo final del subsuelo se obtuvo a partir de la inversión de las curvas de dispersión correspondientes al modo fundamental. Este proceso consiste en proponer un modelo inicial basado en la curva de dispersión observada, realizar una inversión por mínimos cuadrados, calcular el error RMS y ajustar iterativamente el modelo hasta que la curva teórica se aproxime a la curva observada en campo.

Figura 18

Visualización de la ubicación de los sensores sísmicos y puntos de disparos para la adquisición de MASW.

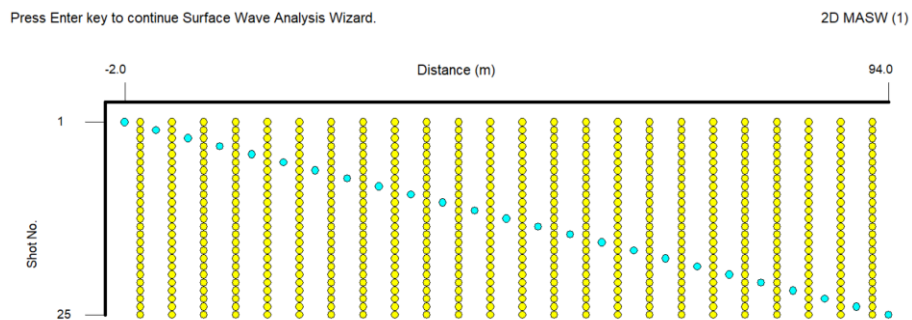
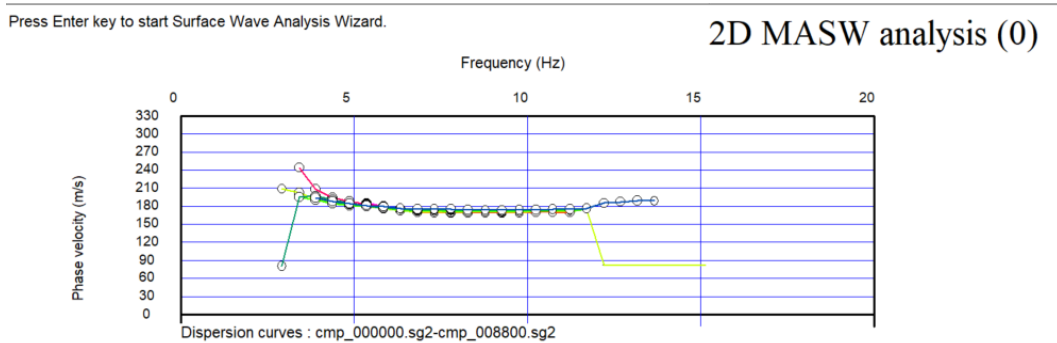


Figura 19

Curvas de dispersión para la evaluación de calidad señal-ruido para la adquisición de MASW

2SD



5.3 Ensayo cargas piloto

Esta etapa puede ser consultada a mayor detalle y sus resultados en Leal y Becerra (2023). Considerando los resultados de la geofísica, se seleccionaron dos puntos para la realización del ensayo de carga: el Punto 1, ubicado en una zona con menores velocidades de propagación de ondas P y S, indicativa de baja rigidez, y el Punto 2, en un sector más estable según los perfiles obtenidos (Tabla 1). En cada punto, se midió el asentamiento mediante diferencias de altura respecto a un punto de referencia, registradas tras la aplicación de cargas sucesivas. Se aplicaron un total de nueve incrementos de carga (placas de 57.6 kg cada una), alcanzando un peso total de 518.4 kg, equivalente a un esfuerzo de contacto de 3240 kg/m^2 .

Tabla 1

Coordenadas de los puntos seleccionados para el ensayo de cargas piloto. Sistema de Magna Sirgas EPSG: 3116. Tomado de Leal y Becerra (2023).

Punto	Coordenada Y	Coordenada X
Punto 1	1274627.155	1103215.356

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Punto	Coordenada Y	Coordenada X
Punto 2	1274635.561	1103203.236
Georreferencia	1274600.675	1103044.689

En cada incremento, el asentamiento se midió cada 2 minutos durante los primeros 10 minutos (Figura 20). Finalizado el último incremento, se realizaron mediciones adicionales cada 20 minutos durante un periodo de 4 horas, permitiendo registrar la evolución temporal del comportamiento del terreno bajo carga. Para ajustar el modelo en el tiempo y evaluar su comportamiento a futuro, las cargas fueron dejadas en los respectivos puntos durante un mes. A lo largo de este periodo, se realizaron mediciones adicionales de control para registrar la evolución de los asentamientos y validar el comportamiento del terreno bajo cargas sostenidas.

Figura 20

a) Montaje de la placa base para ubicar la regla de medición y las cargas aplicadas progresivamente para realizar la b) medición del asentamiento a lo largo de periodo de evaluación. Tomado de Leal y Becerra (2023).



5.4 Selección del modelo teórico de estimación de asentamiento

En esta etapa se realizó una revisión de la literatura con el propósito de identificar modelos teóricos que permitan estimar los asentamientos en rellenos sanitarios. La selección del modelo más apropiado requiere considerar no solo la capacidad de ajuste a datos experimentales, sino también la representación realista de los mecanismos físicos involucrados, tales como la consolidación primaria y los efectos de creep.

Se realizaron ajustes a las propiedades del suelo para cada una de las capas en los modelos utilizados, con el objetivo de reproducir los valores de asentamiento observados en campo. El análisis se llevó a cabo dentro de un marco hidro-mecánico acoplado, asumiendo temperatura constante en el tiempo. Esto implica que el estudio se realizó en términos de esfuerzos efectivos, donde las condiciones de permeabilidad y los límites del modelo influyen en las variaciones de la presión de agua, el flujo y los cambios en la porosidad. Estas variaciones afectan directamente los esfuerzos efectivos, generando deformaciones diferidas en el tiempo, además de las asociadas al comportamiento viscoelástico del material.

Para predecir los asentamientos inmediatos, se utilizó un modelo elástico calibrado manualmente a partir de los módulos de elasticidad obtenidos en el estudio geofísico. Estos valores fueron ajustados en el software hasta replicar los asentamientos medidos en campo, manteniendo constantes los coeficientes de Poisson. Para simular los desplazamientos diferidos en el tiempo, se empleó un modelo viscoelástico, al cual se le incorporaron propiedades de viscosidad. Se consideraron variables como el tamaño de partícula, la energía de activación y el parámetro pre-exponencial.

5.5 Modelado Code Bright

A continuación, se presenta una versión simplificada de la metodología de simulación, la cual replica el enfoque de Leal y Becerra (2023) aplicado al relleno sanitario El Carrasco. En su estudio, los autores desarrollaron un modelamiento 1D considerando puntos de carga independientes. Con base en sus resultados, en este trabajo se optó por evaluar los asentamientos utilizando un modelo 2D integrado, que considera la acción simultánea de todas las cargas aplicadas. Para simular la evolución de los asentamientos observados durante la prueba de carga, se utilizó el software GiD-Code Bright (Code Bright, 2023), con el objetivo de calibrar modelos constitutivos básicos que permitan estimar el comportamiento del terreno bajo estructuras de soporte para paneles solares. Se plantearon dos enfoques: uno elástico y otro viscoelástico. Inicialmente, se modeló la geometría del perfil estratigráfico a partir de los espesores de capa obtenidos mediante estudios geofísicos. Posteriormente, se asignaron propiedades mecánicas, hidráulicas y viscosas a cada estrato, las cuales fueron calibradas de manera iterativa según el tipo de modelo, hasta reproducir los asentamientos medidos en campo con una buena aproximación.

Se elaboraron tres modelos principales: un modelo geométrico inicial (01) para validar el comportamiento general; y dos modelos elásticos lineales, 02a y 02b, (Figura 21, Figura 22) con módulos de Young y coeficientes de Poisson calculados para siete capas, considerando porosidades entre 25–30 % y 25–60 %, respectivamente. A todos los modelos se les aplicó una etapa inicial de estabilidad por gravedad de 100 horas. La simulación hidráulica se realizó en condición saturada, incluyendo propiedades como permeabilidad intrínseca y condiciones de flujo, considerando una mezcla de agua y lixiviado como fase líquida. Estos modelos fueron considerados ensayos preliminares, cuyo objetivo fue evaluar los resultados y conclusiones planteados por Leal y Becerra (2023). Los autores destacan la necesidad de un ajuste iterativo de parámetros con el fin de garantizar la reproducibilidad del comportamiento del asentamiento en el tiempo.

Para la simulación del proceso de carga, se consideró un intervalo inicial de 1000 días para establecer la condición geostática del terreno antes de aplicar cargas. Los datos de campo permitieron aplicar incrementos de carga y tiempos acumulados para obtener los asentamientos simulados. La calibración del modelo elástico se realizó ajustando iterativamente los módulos de elasticidad por estrato, manteniendo constantes los coeficientes de Poisson, hasta reproducir los asentamientos registrados. En el modelo viscoelástico, además de los parámetros elásticos, se

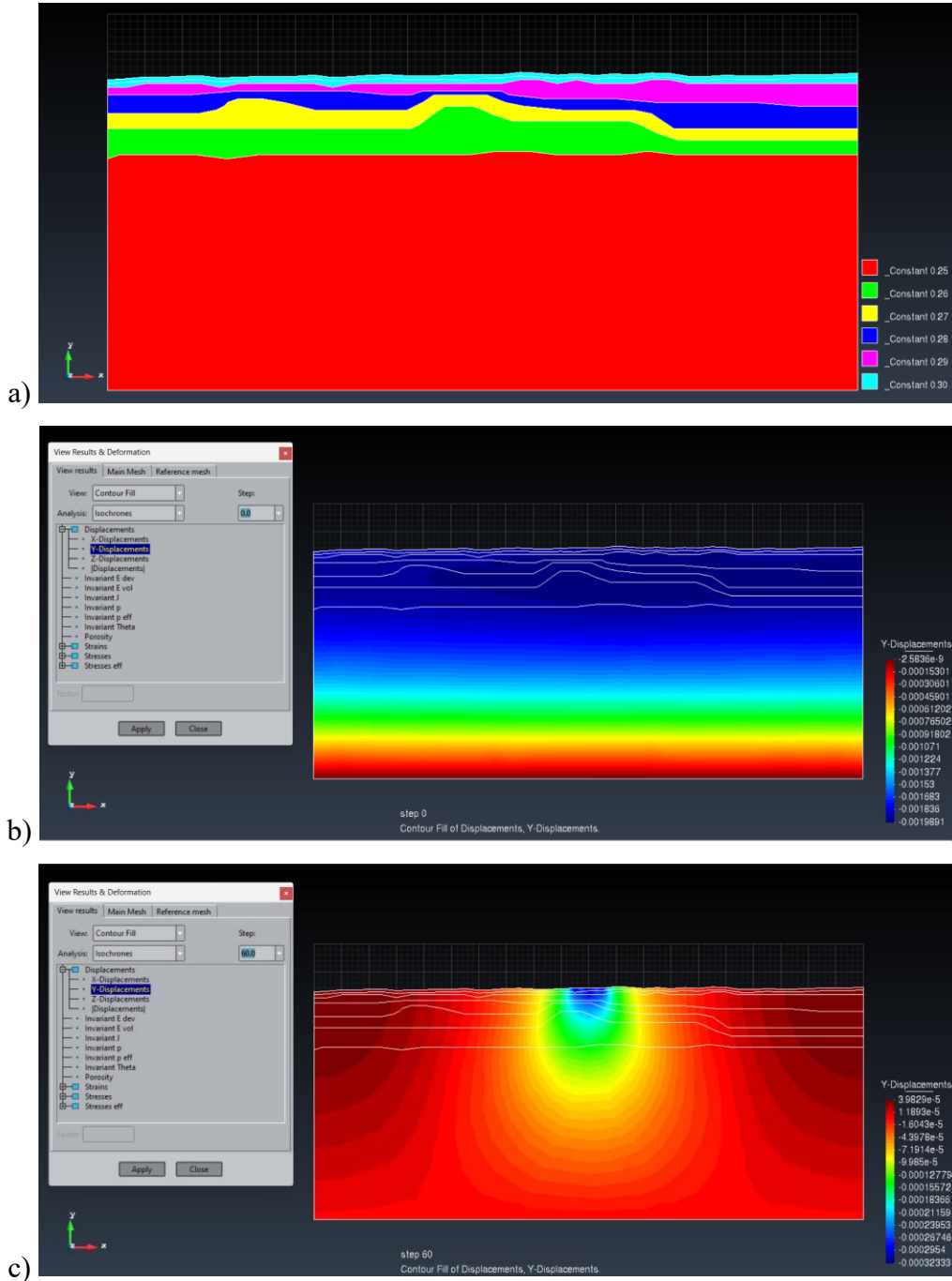
Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

incorporaron propiedades de viscosidad como densidad (2450 kg/m^3), tamaño de partícula, energía de activación (2700 J/mol) y un parámetro pre-exponencial, representativos de suelos arenoso-limosos típicos del área (Quirós, 2019). La viscosidad se ajustó hasta lograr una respuesta acorde con los asentamientos observados. La deformación en el tiempo se modeló como una función de componentes volumétrica y desviadora en función de los esfuerzos efectivos aplicados (Code Bright User's Guide, 2022).

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 21

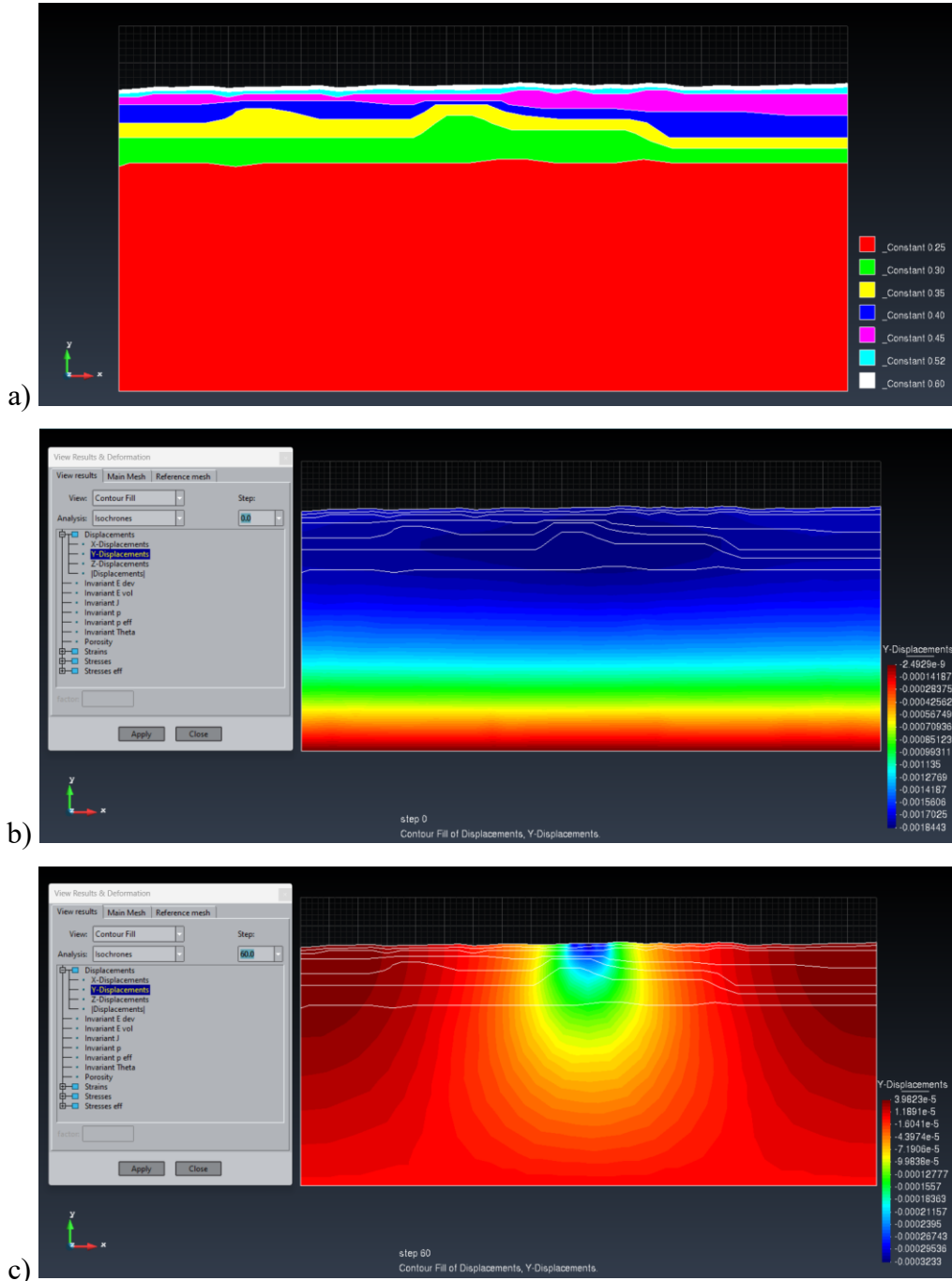
a) Valores de porosidad para cada una de las capas en el Modelo 02a con valores entre el 25–30% (0.25-0.30), b) Desplazamiento en la vertical o eje Y en el minuto 0, y c) minuto 60.



Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 22

a) Valores de porosidad para cada una de las capas en el Modelo 02b con valores entre el 25–60% (0.25-0.6), b) Desplazamiento en la vertical o eje Y en el minuto 0, y c) minuto 60.



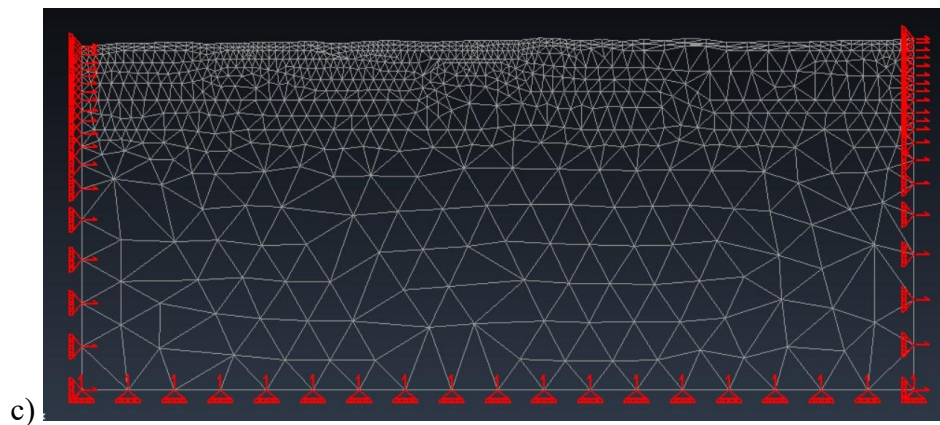
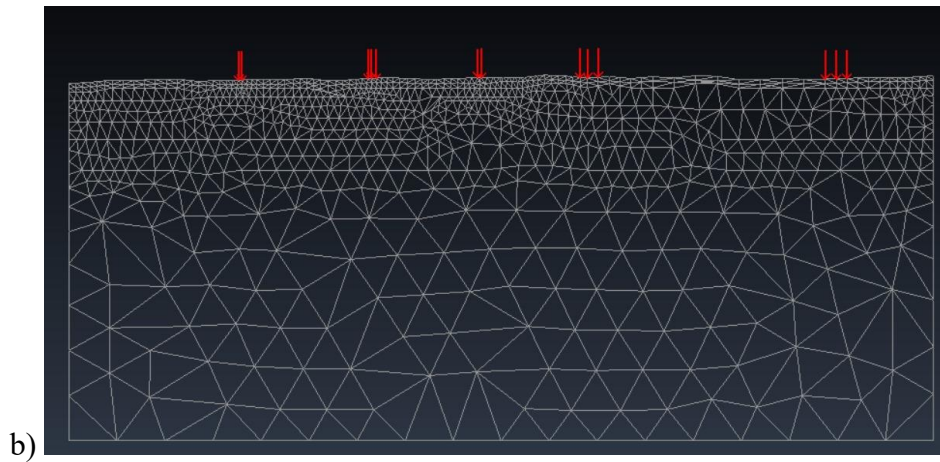
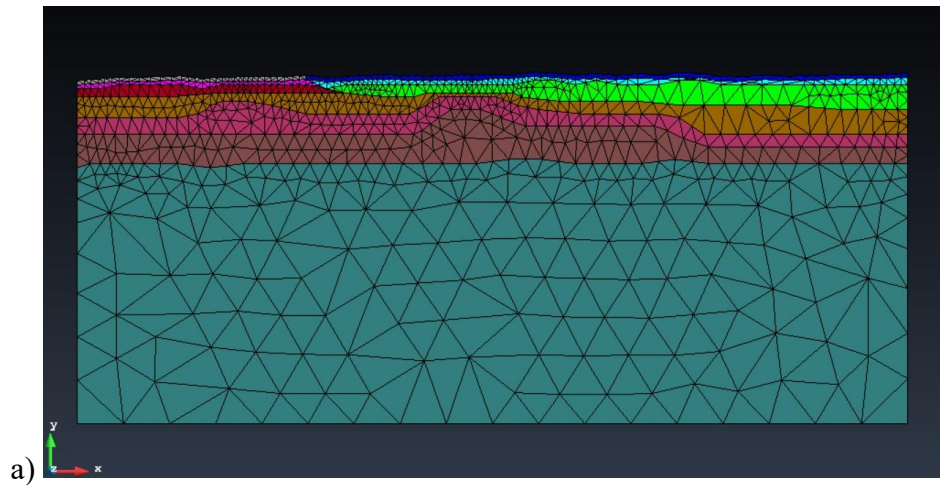
Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Con base en la información preliminar obtenida de la respuesta de los modelos y en el trabajo de Leal y Becerra (2023), se procedió a desarrollar un modelo más representativo de la realidad, incorporando una mayor cantidad de cargas. El proceso inició con el ajuste de las primeras capas del modelo (Figura 23a), considerando los resultados obtenidos de los asentamientos realizados con las pruebas de cargas y la respuesta geofísica heterogénea. Posteriormente, se establecieron cinco puntos de aplicación de carga (Figura 23b), y, adicionalmente, para garantizar un comportamiento adecuado en los bordes del modelo, se realizaron ajustes en los parámetros de frontera (Figura 23c). Una vez ajustado el modelo a la respuesta observada en las cargas piloto, se procedió a simular su comportamiento para diferentes horizontes temporales, correspondientes a 1 día (Figura 24), 3 meses (Figura 25), 1 año (Figura 26) y 10 años (Figura 27).

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 23

a) Modelo discretizado ajustado considerando los resultados de las pruebas de cargas piloto y la geofísica. b) localización de los cinco puntos para aplicar las cargas en la simulación. c) Ajuste en las condiciones de frontera.



Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 24

Desplazamiento en Y del modelo considerando cinco puntos de carga a 1 día de simulación.

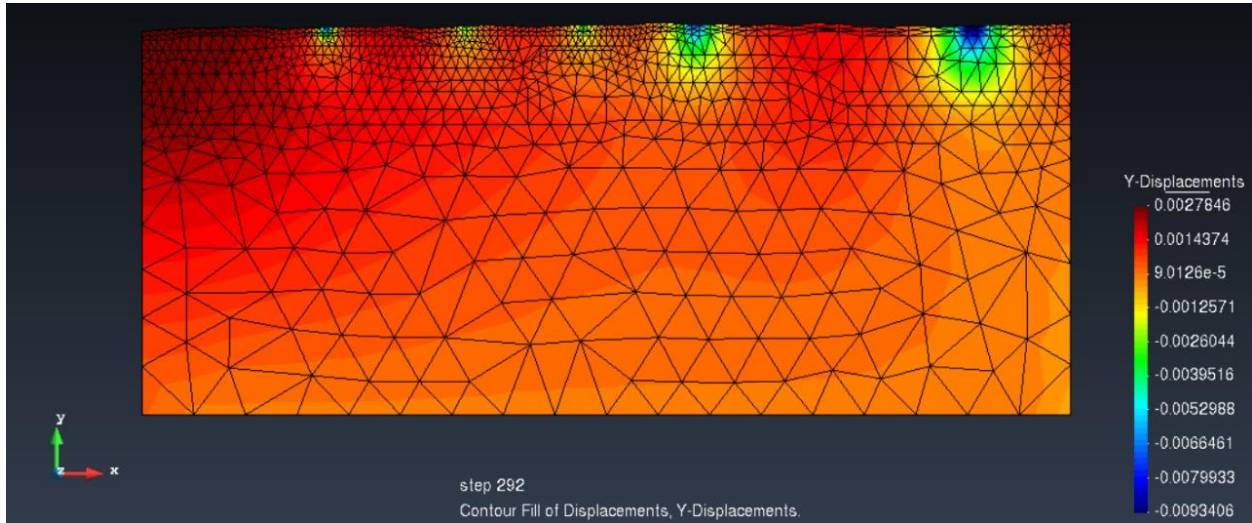
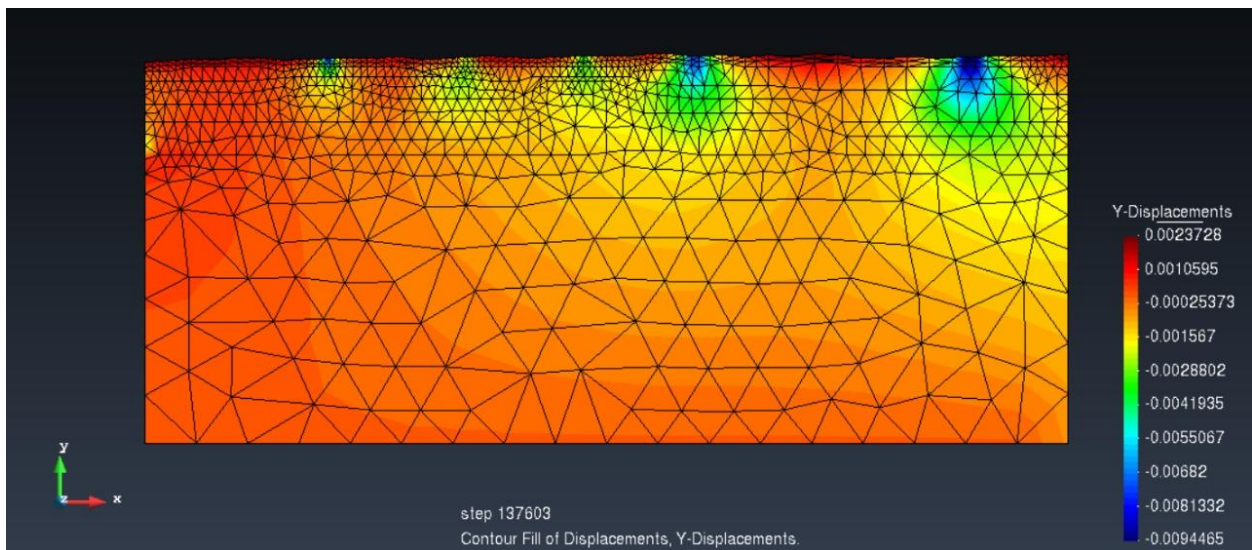


Figura 25

Desplazamiento en Y del modelo considerando cinco puntos de carga a 3 mes de simulación.



Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 26

Desplazamiento en Y del modelo considerando cinco puntos de carga a 1 año de simulación.

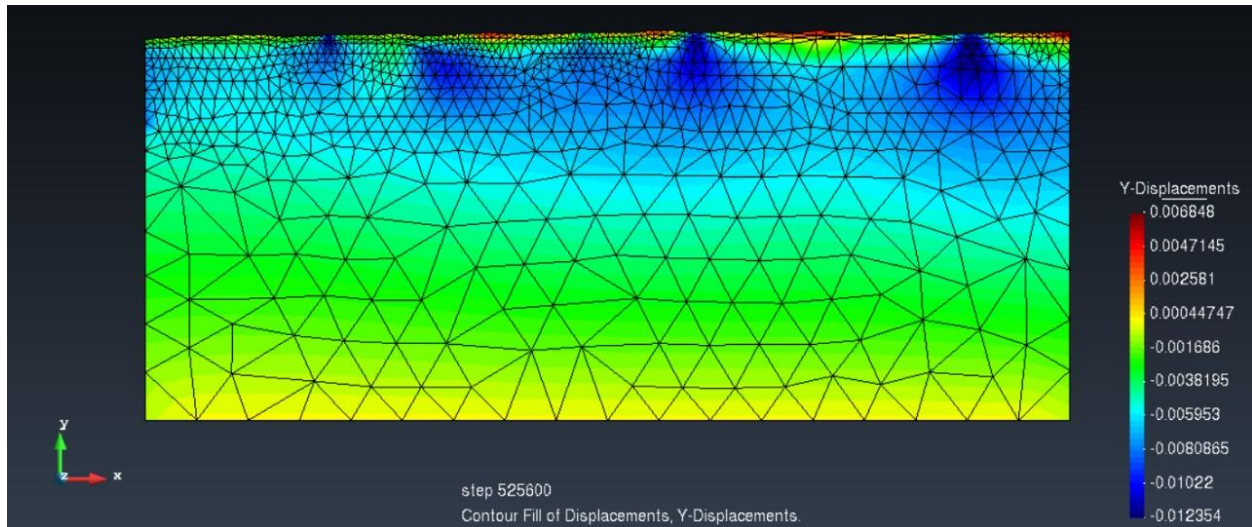
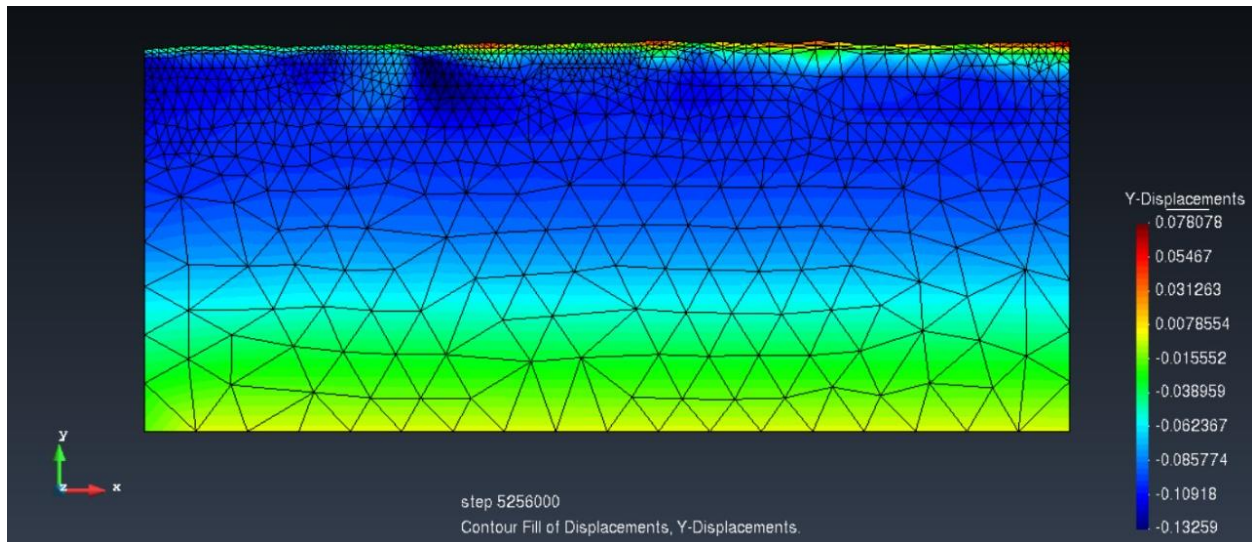


Figura 27

Desplazamiento en Y del modelo considerando cinco puntos de carga a 10 años de simulación.



6 Resultados

6.1 Adquisición geofísica

6.1.1 Resultados Tomografía de Resistividad Eléctrica

Los resultados de la inversión de los datos adquiridos de la TRE para los arreglos Gradiente (Figura 28) presenta anomalías de resistividad inferiores a los $391 \Omega \cdot m$ a profundidades promedio mayores de los 5 metros para ambos arreglos, los primeros 2 metros presentan este mismo rango de resistividad. Sobre las abscisas $X=20m$ y $X=38m$ se observan cambios en la resistividad asemejando una estructura vertical que conecta con la superficie con sectores de baja resistividad identificados. Por la geometría del arreglo Dipolo-Dipolo estas anomalías son más evidentes. Entre las profundidades aproximadas de 2 a 5 metros se observa una semi-continuidad lateral de resistividades mayores a los $1012 \Omega \cdot m$, donde en algunos sectores la inversión generó estructuras bastante geométricas en el arreglo Dipolo-Dipolo, atribuibles a las características de sensibilidad y configuración de dicho arreglo.

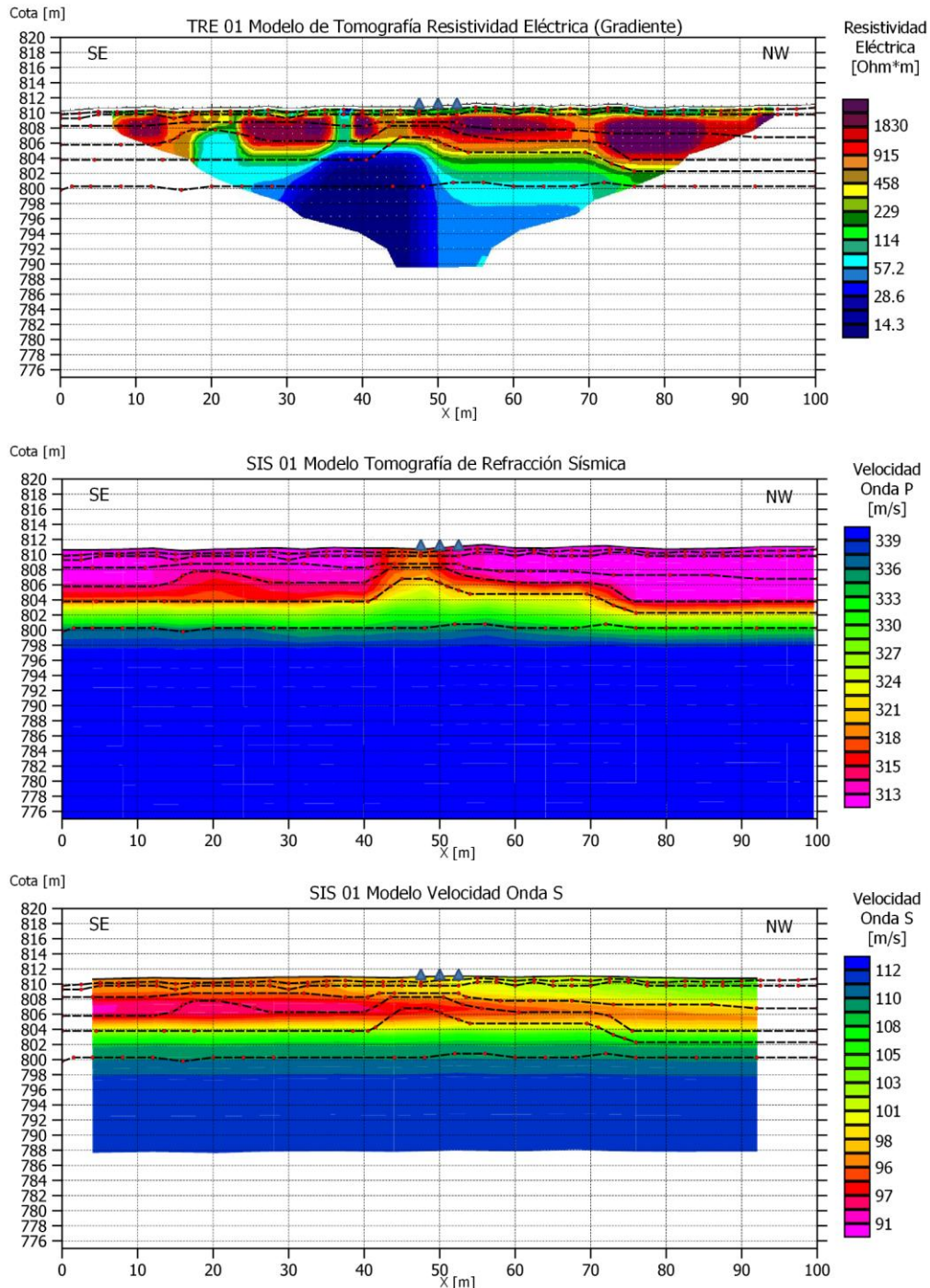
6.1.2 Resultados Sísmica de refracción

El modelo recuperado en la Tomografía de Refracción Sísmica del 8 de marzo del 2022 (Figura 28) estima velocidades entre los 313 a $339 m \cdot s^{-1}$, considerando el principio teórico de que el valor de la velocidad de la onda tipo P incrementa en profundidad. En promedio los 10 metros de profundidad las velocidades son inferiores a los $330 m \cdot s^{-1}$, incrementado hasta valores cercanos a los $339 m \cdot s^{-1}$ en profundidades promedio de 20 metros (ultimo refractor considerado por el modelo recuperado).

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 28

Resultados de las adquisiciones geofísicas y su procesamiento de la TRE, Sísmica de Refracción y MASW realizados el 8 de marzo de 2022. Considerando los resultados de los tres modelos se diferenciaron para el modelo en Code Bright siete (7) capas horizontales.



6.1.3 Resultados Sísmica MASW

El modelo recuperado del ensayo sísmico de MASW del 8 de marzo del 2022 (Figura 14) estima velocidades entre los 91 a $112 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, y presentan una variación horizontal de la velocidad de la onda tipo S en el modelo generado por la inversión. Los primeros 2 metros de profundidad del modelo estima velocidades inferiores a los $101 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, estimando una disminución de la velocidad a profundidades entre los 3 a 5 metros de $96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. A profundidades entre los 6 a 10 estiman velocidades entre los $105 \text{ a } 110 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a profundidades mayores a los 10 metros se estiman velocidades superiores a los $111 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

6.2 Cálculo módulos dinámicos

6.2.1 Estimación de parámetros elásticos 1D

Los resultados de los tres modelos geofísicos fueron diferenciados en siete capas cuasi horizontales para su posterior modelamiento en Code Bright, A continuación, se integraron los valores de velocidad de onda P obtenidos mediante sísmica de refracción y los valores de velocidad de onda S provenientes del análisis MASW, ambos adquiridos el 8 de marzo de 2022. Con esta información, se calcularon los módulos dinámicos (Tabla 1) para cada metro de profundidad, tomando como referencia el punto medio de la línea sísmica (abscisa $X = 46.0$). Este punto fue seleccionado debido a que, en métodos de exploración geofísica, la información más confiable y representativa del modelo suele concentrarse en la zona central de los perfiles.

Tabla 2

Módulos dinámicos calculados para los resultados de Sísmica de Refracción y MASW del 8 de marzo de 2022. Valores correspondientes a la abscisa $X=46.0$ metros a lo largo de la línea sísmica.

Capa	Velocidades		Poisson σ Adimensional	Densidad Kg/m ³	Rigidez G MPa	Young E MPa	Bulk K MPa
	Vp (m/s)	Vs(m/s)					
1	313,09	99,35	0,44	1302,09	12,85	37,12	110,50
2	313,07	99,83	0,44	1302,07	12,98	37,46	110,31
3	312,90	100,37	0,44	1301,89	13,12	37,84	109,98
4	312,87	98,22	0,45	1301,87	12,56	36,31	110,69
5	316,74	100,27	0,44	1305,87	13,13	37,93	113,51
6	327,21	108,68	0,44	1316,53	15,55	44,72	120,22
7	338,70	110,70	0,45	1327,94	16,27	46,87	130,64

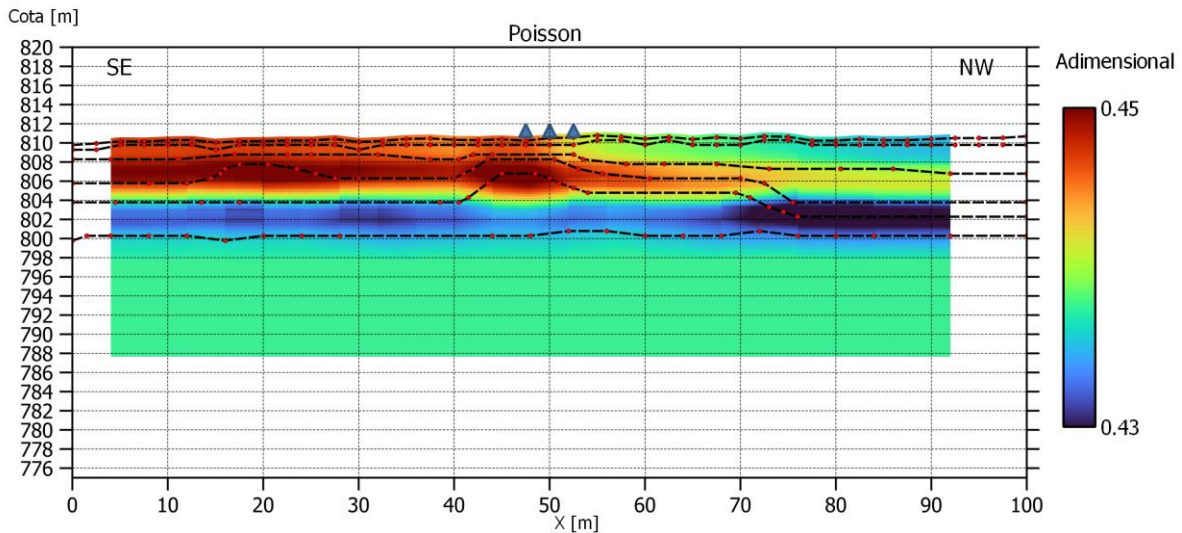
6.2.2 Estimación de parámetros elásticos 2D

Aunque la mayor confiabilidad y redundancia de información en los modelos geofísicos se concentra generalmente en el centro del perfil, también fue posible extraer información a lo largo de los perfiles sísmicos de refracción y MASW para calcular diversos parámetros geotécnicos: coeficiente de Poisson, densidad, módulo de rigidez (G), módulo de Young (E), módulo de compresibilidad volumétrica (Bulk) y la relación entre velocidades sísmicas (V_p/V_s). Este análisis lateral permitió evaluar variaciones en las propiedades mecánicas y complementar la interpretación estratigráfica del modelo en siete capas.

Los valores del coeficiente de Poisson oscilan entre 0.43 y 0.45 (Figura 29), siendo más altos cerca de la superficie. Esta distribución evidencia la heterogeneidad típica de los residuos en fase de estabilización: valores altos indican materiales muy compresibles y saturados, como la cobertura final o residuos recientes con alta humedad y contenido orgánico. En contraste, los valores más bajos se asocian a materiales más rígidos y secos, posiblemente residuos antiguos o el suelo base compactado que actúa como estrato de soporte.

Figura 29

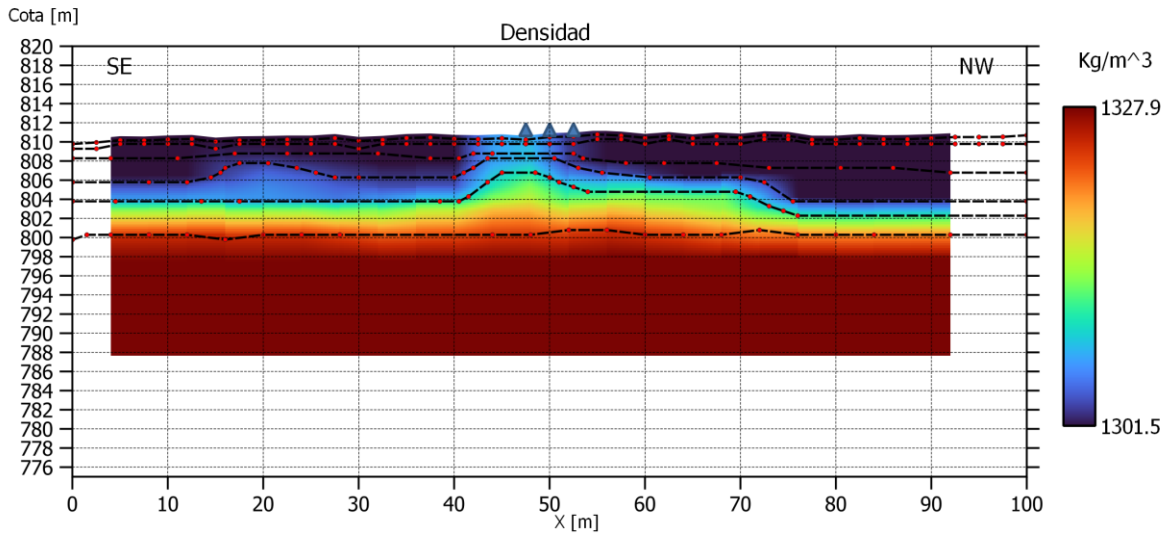
Modelos 2D de parámetro geotécnico correspondiente a Poisson calculado a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S de la adquisición sísmica.



La densidad estimada varía entre 1300 y 1327 kg/m^3 (Figura 30). Los valores más altos, encontrados a mayor profundidad, corresponden a la arcilla compactada o al sustrato natural. Hacia la superficie, la densidad disminuye progresivamente, lo cual refleja la presencia de residuos más sueltos, con mayor porosidad y posible contenido de lixiviados.

Figura 30

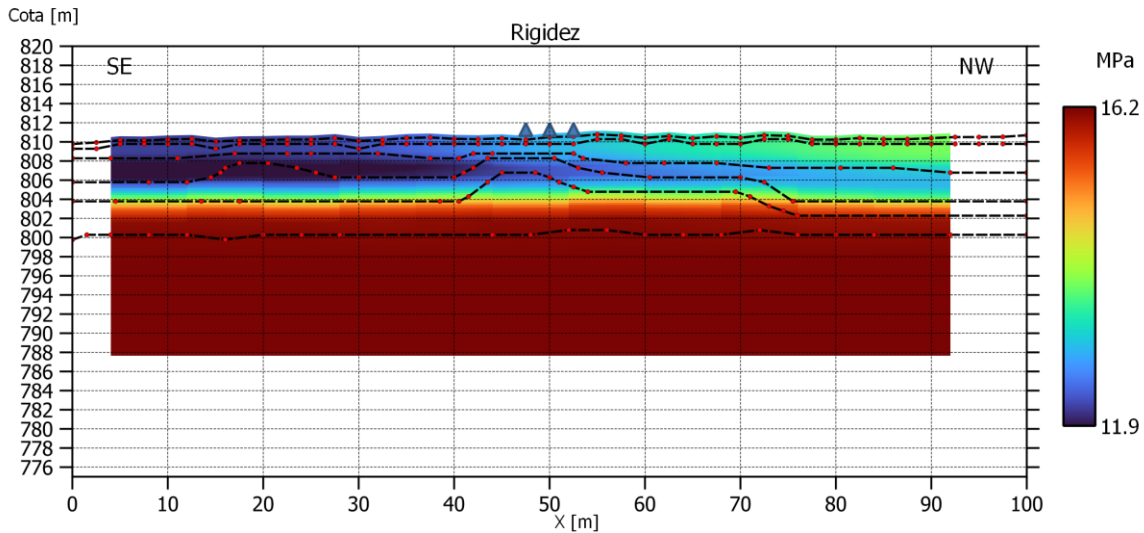
Modelos 2D de la densidad calculado a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S de la adquisición sísmica.



El módulo de rigidez (G) se encuentra en el rango de 12 a 165 MPa (Figura 31). Esta variación confirma la estratificación mecánica del relleno sanitario. Los valores altos, localizados en la base, reflejan una capa más compactada (arcilla o fundación), mientras que los valores bajos indican zonas débiles asociadas a residuos recientes o acumulación de lixiviados, donde podrían generarse asentamientos diferenciales si no se controlan adecuadamente las cargas.

Figura 31

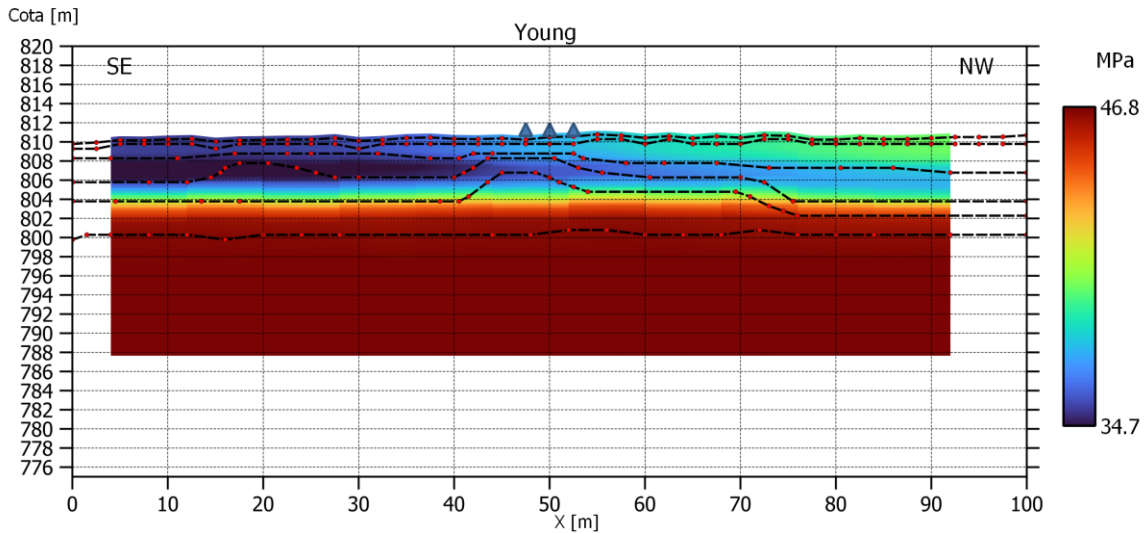
Modelos 2D de parámetro geotécnico correspondiente a Rigidez calculado a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S de la adquisición sísmica.



El módulo de Young (E) presenta valores entre 35 y 46 MPa (Figura 32) y sigue el patrón observado en los parámetros anteriores. El sustrato basal actúa como una capa rígida de soporte, mientras que el cuerpo de residuos muestra una reducción notable en este módulo, típica de materiales sueltos y húmedos, con mayor susceptibilidad a deformaciones bajo carga.

Figura 32

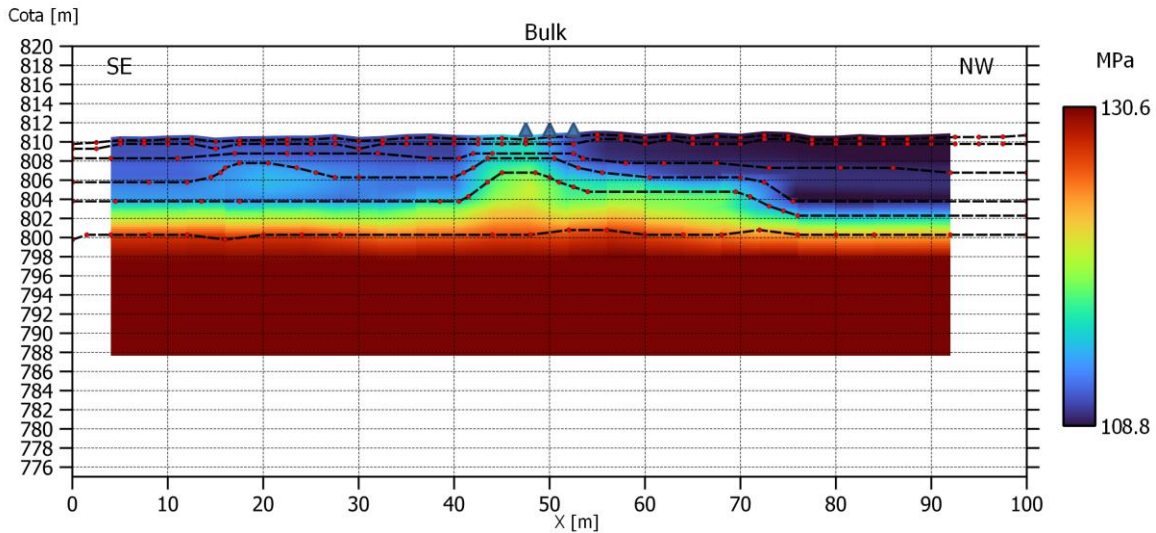
Modelos 2D de parámetro geotécnico correspondiente a Young calculado a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S de la adquisición sísmica.



El módulo de compresibilidad volumétrica (Bulk) varía entre 108 y 130 MPa (Figura 33), reforzando la zonificación observada. En el sustrato basal, los valores altos indican una muy baja deformabilidad, mientras que en los residuos superiores se evidencian valores sensiblemente menores, propios de materiales con alta porosidad y humedad. Se identifica una zona de transición que podría corresponder a un sector de recompactación o acumulación de lixiviados, donde la compresibilidad es intermedia.

Figura 33

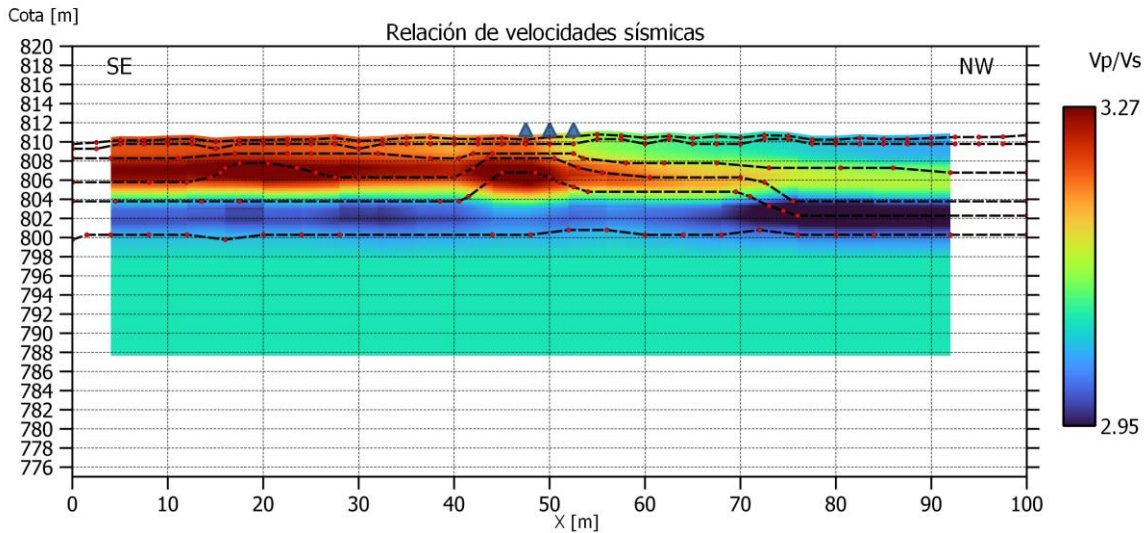
Modelos 2D de parámetro geotécnico correspondiente a Bulk calculado a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S de la adquisición sísmica.



La relación adimensional V_p/V_s se encuentra entre 2.95 y 3.27 (Figura 34), lo cual acentúa la diferenciación de velocidades producto a la posible presencia de agua y variaciones mecánicas del relleno sanitario. El sustrato basal, a 10 metros de profundidad aproximadamente, se asocia a un medio arcilloso rígido, parcialmente drenado y con baja presión de poros. Los cocientes más altos reflejan mayor saturación y una diferencia significativa entre la propagación de ondas P y S, propias de materiales sueltos con elevado contenido de agua y materia orgánica. A profundidades intermedias, el aumento progresivo de esta relación sugiere la presencia de lixiviados acumulados o compactación diferencial, indicando zonas críticas que deben ser consideradas en el diseño y operación de estructuras sobre el relleno.

Figura 34

Relación de velocidades de onda P y onda S obtenidas de adquisición sísmica. La expresión utilizada corresponde a V_p/V_s .



6.3 Resultado cargas piloto

Los resultados del primer día de ensayo (Figura 35 y Figura 36) muestran un asentamiento inmediato asociado al incremento progresivo de la carga y al correspondiente esfuerzo de contacto aplicado. En ambos puntos de medición se observa un patrón similar, con un aumento brusco del asentamiento tras cada carga, seguido de una etapa de estabilización temporal. No obstante, el Punto 1 presentó asentamientos más elevados, en concordancia con los resultados geofísicos, que indican menores velocidades de onda P y S, implicando una menor rigidez del suelo en esa zona. El comportamiento registrado durante todo el periodo de monitoreo (Figura 37 y Figura 38) evidencia una disminución progresiva en la tasa de asentamiento, lo que sugiere un proceso continuo de estabilización del terreno bajo carga sostenida.

Figura 35

Curvas de asentamiento en el tiempo para: a) Punto 1 y b) Punto 2, registradas durante el primer día de aplicación de las cargas. Tomado de Leal y Becerra (2023).

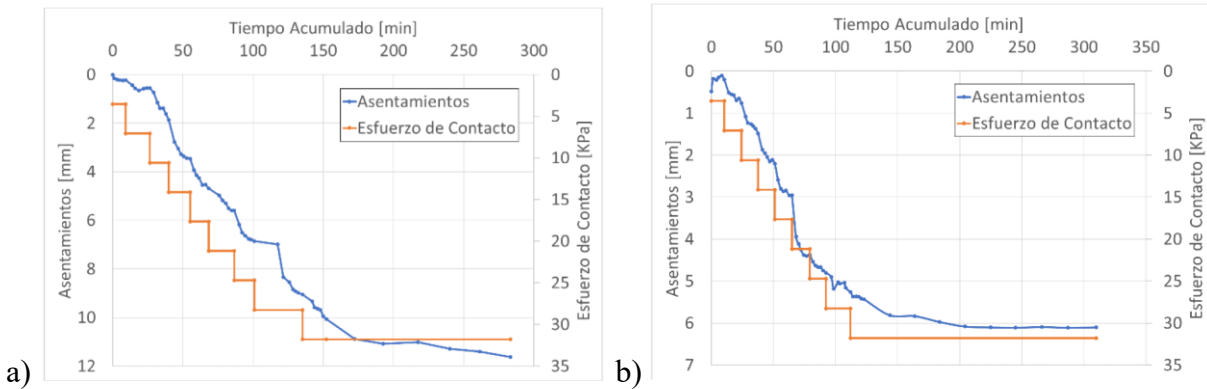
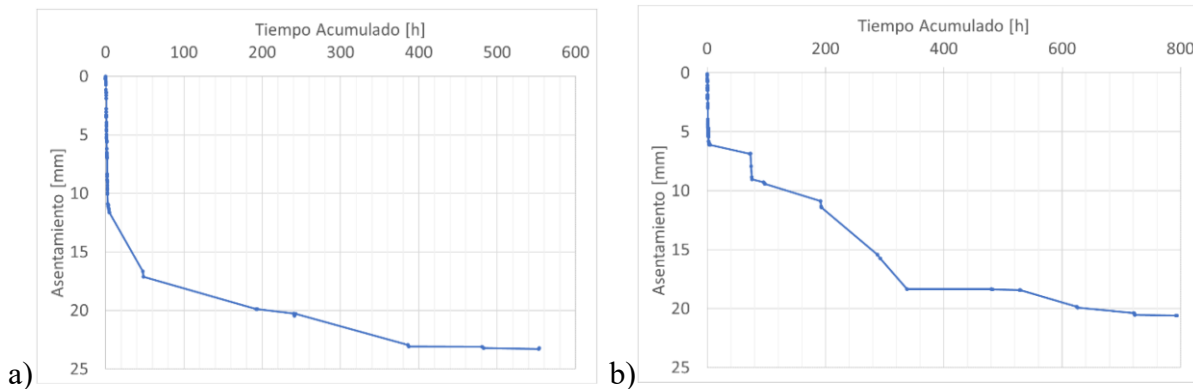


Figura 36

Curvas de asentamiento en el tiempo para el a) Punto 1 y b) Punto 2, correspondientes al periodo posterior a la aplicación total de la carga localizada. Tomado de Leal y Becerra (2023).



6.4 Modelo teórico

El modelo hiperbólico, de naturaleza empírica, ha mostrado buenos ajustes en registros de asentamientos en residuos sólidos urbanos, pero su principal limitación es que no permite distinguir ni analizar los tres mecanismos que intervienen en los asentamientos. En contraste, el

modelo de Zeevaert considera la acción simultánea de asentamientos primarios y secundarios, incorporando la unidad Z para representar la viscosidad intergranular asociada a deformaciones plástico-viscosas. Modelos como el Exponencial y el propuesto por Marques et al. (2003) retoman esta idea, integrando una unidad análoga a la unidad Z, con el fin de representar el creep en las áreas de depósitos de residuos sólidos. En particular, el modelo de Marques et al. (2003) resulta más completo, ya que contempla los efectos combinados de carga mecánica y descomposición biológica en la etapa secundaria, permitiendo caracterizar la influencia relativa de los distintos mecanismos de asentamiento bajo diversas condiciones ambientales y operativas.

6.5 Modelado Code Bright

Para esta etapa del modelamiento se integró toda la información en un único modelo representativo con el fin de evaluar los asentamientos en la Cárcava 1, considerando los resultados previos reportados por Leal y Becerra (2023). La calibración se realizó utilizando los asentamientos medidos por estos autores, donde se evidenció un comportamiento típico, ocurriendo un asentamiento rápido en los primeros minutos, seguido de una etapa de estabilización progresiva del terreno. A partir de los datos del proceso de carga en campo, se definieron los tiempos acumulados y los incrementos de carga correspondientes, lo que permitió simular dicho proceso en el software Code Bright y obtener los valores teóricos de asentamiento. La modelación hidráulica se ejecutó bajo condición saturada, por ser esta la situación más crítica; en este contexto, la presión de líquido se consideró como presión de agua, aunque en realidad corresponde a una mezcla entre agua y lixiviado.

Los resultados de la calibración del modelo (Figura 37 y Figura 38), el cual reproduce adecuadamente el comportamiento de los asentamientos registrados en campo. En esta simulación

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

se incluyeron únicamente las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo. Como resultado de la aplicación de carga, se evidenció una disminución progresiva de la porosidad, reflejando una reducción de los espacios vacíos en el volumen total del suelo y, por ende, un aumento en la densidad. En el modelo viscoelástico, la porosidad mostró un comportamiento similar: una reducción abrupta inicial tras la aplicación de la carga, seguida de una disminución más lenta en la tasa de cambio de la porosidad con el tiempo. Esta variación fue más significativa en los primeros 0.4 metros de profundidad, a partir de los cuales no se registraron cambios importantes, lo que sugiere que los efectos de compactación y consolidación son más relevantes en los niveles superficiales del relleno.

Figura 37

Modelo de asentamientos totales del punto 1 en tiempo total. Tomado de Leal y Becerra (2023).

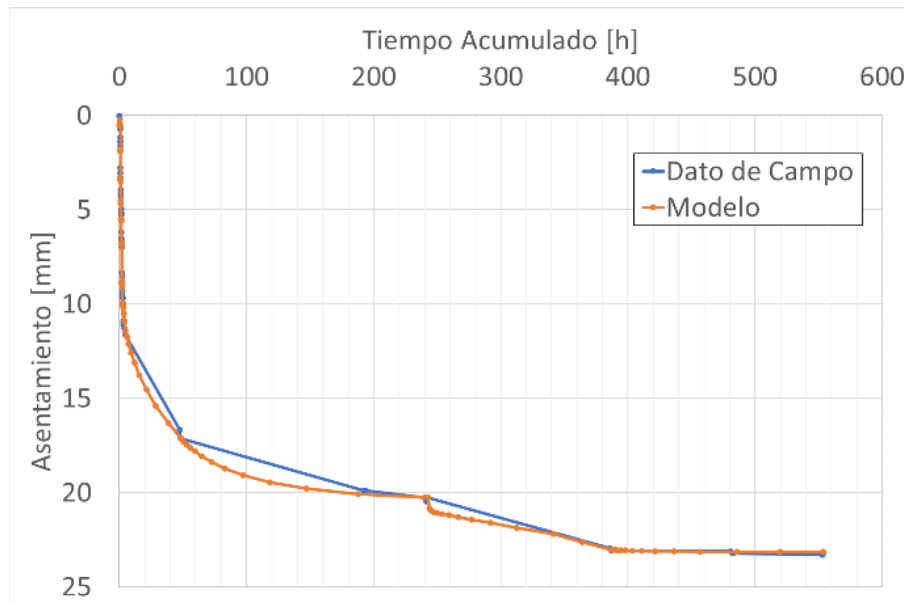
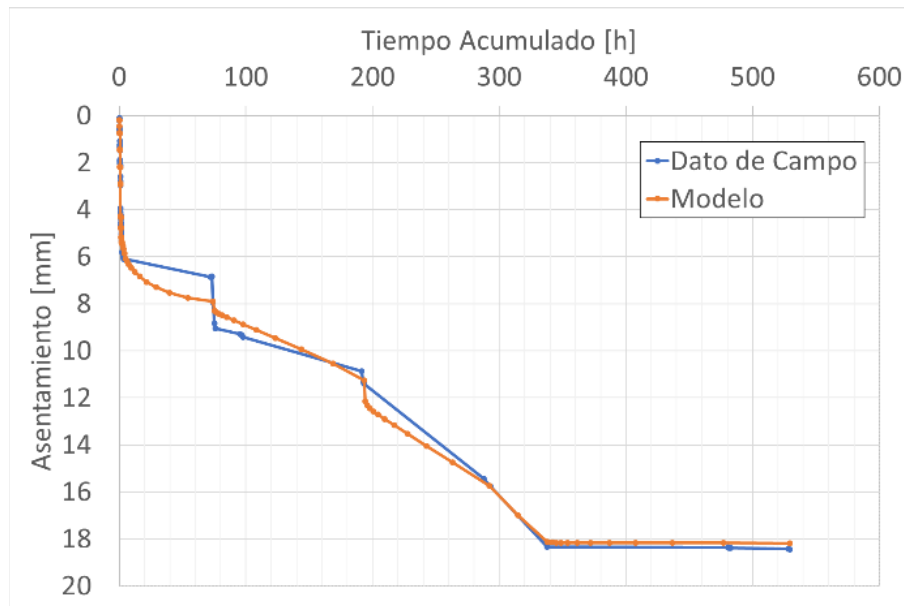


Figura 38

Modelo de asentamientos totales del punto 2 en tiempo total. Tomado de Leal y Becerra (2023).



Al igual que en el estudio de Leal y Becerra (2023), se graficaron los desplazamientos del suelo a partir de las mediciones en campo tras la aplicación de cargas sucesivas, observándose un comportamiento coherente con los resultados geofísicos, en la que los sectores con menores velocidades de onda presentaron mayores asentamientos, lo cual es típico de materiales más blandos y con menor rigidez. No obstante, fue necesario realizar una reducción de los módulos elásticos, reduciendo sus valores a magnitudes inferiores, tal como también lo reportaron Leal y Becerra (2023). Esta diferencia se explica porque los métodos geofísicos reflejan condiciones de deformación muy pequeñas, mientras que los materiales de relleno, por su naturaleza, tienden a degradarse con el tiempo y a disminuir su rigidez bajo condiciones de carga reales, y por tanto los niveles de deformación superan ampliamente los niveles de deformación de la geofísica.

Al evaluar el modelo ajustado a las heterogeneidades del terreno, el comportamiento de los desplazamientos en la dirección Y a lo largo del tiempo muestra una evolución progresiva acorde

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

con el incremento de los periodos simulados. A 1 día, los desplazamientos son mínimos y localizados principalmente en las zonas de aplicación de las cargas, evidenciando una respuesta inicial elástica del modelo. Tras 3 meses, se observa un ligero aumento en las zonas afectadas, comenzando a manifestarse un patrón más amplio de deformación, inferiores a -0.01 metros. Al alcanzar 1 año, los desplazamientos se intensifican de manera significativa, logrando valores de -0.015 metros, extendiéndose hacia áreas más profundas del modelo, lo que refleja la consolidación progresiva y los efectos iniciales de deformaciones de tipo creep. Finalmente, a 10 años se logran un valor de -0.55 metros, se aprecia una redistribución más homogénea de las deformaciones en todo el volumen modelado, acompañada de un notable incremento en la magnitud de los desplazamientos negativos (hundimiento), indicando la dominancia de procesos de asentamiento secundario relacionados con fenómenos de viscosidad intergranular y degradación de los materiales.

El comportamiento observado en el Punto P1 (Figura 39) muestra un asentamiento progresivo caracterizado por una deformación inicial rápida, asociada a la consolidación primaria, seguida de una fase de asentamiento más lento y continuo, atribuible a procesos de creep. Este patrón es consistente con lo esperado en los procesos de asentamiento de rellenos sanitarios, donde los efectos de compresión primaria predominan en las etapas iniciales, mientras que la deformación secundaria, vinculada al reacomodamiento de partículas y la descomposición de residuos, se convierte en el principal mecanismo de deformación a largo plazo.

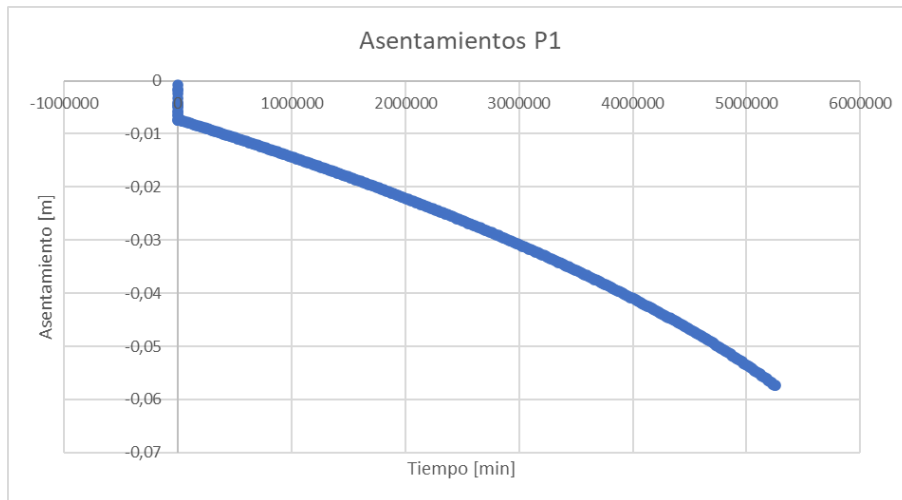
El perfil de asentamiento a una profundidad constante de 10 metros (Figura 40), evaluado después de 10 años, muestra una distribución heterogénea a lo largo de la distancia analizada. Se observan variaciones locales en la magnitud del asentamiento, con zonas de mayor deformación que coinciden con las áreas de aplicación de carga. Estas variaciones reflejan la respuesta

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

diferencial del material debido a la heterogeneidad del medio y a la redistribución progresiva de esfuerzos a lo largo del tiempo. El patrón general indica un asentamiento acumulado significativo, consistente con los procesos de consolidación secundaria y creep característicos de los rellenos sanitarios a largo plazo.

Figura 39

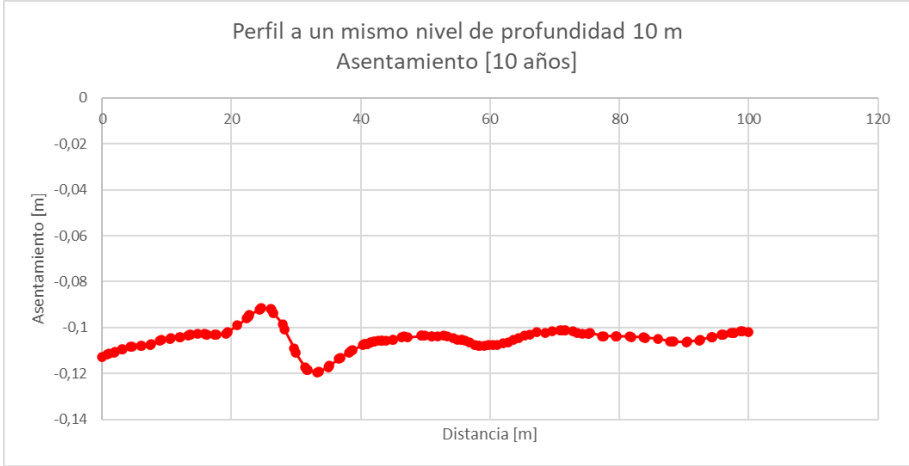
Evolución del asentamiento en el punto P1 localizado en la Cárcava 1 en las coordenadas 1274627.155 Este y 1103215.356 Norte.



Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Figura 40

Perfil de asentamiento a 10 m de profundidad tras 10 años.



7 Discusión

Para evaluar la estabilidad del terreno en el relleno sanitario El Carrasco, se seleccionó la Cárcava 1, un sector con más de 20 años de antigüedad y un área aproximada de 17 hectáreas. Mediante los métodos geofísicos MASW, TRE y TRS, se obtuvieron velocidades de onda P inferiores a $339 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y de onda S inferiores a $112 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. A partir de estos valores se calcularon parámetros elásticos como el módulo de corte y el coeficiente de Poisson. La resistividad eléctrica mostró valores inferiores a $50 \Omega \cdot \text{m}$ en zonas asociadas a la acumulación de lixiviados, mientras que resistividades superiores a $1500 \Omega \cdot \text{m}$ se vinculan con materiales más compactos y secos, cercanos a la superficie.

En conjunto, los resultados sugieren condiciones favorables para la instalación de un parque fotovoltaico, siempre que se implementen programas sistemáticos de control y seguimiento de la estabilidad del terreno. El ensayo de carga piloto registró desplazamientos del orden de 2 cm en un periodo de 30 días, información que fue utilizada para calibrar un modelo teórico esfuerzo-deformación-tiempo. Este modelo permitió reproducir de manera confiable tanto la respuesta inmediata como el proceso de consolidación diferida del relleno sanitario.

7.1 Discusión geofísica

Los métodos geoelectricos, como los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), permiten determinar el número de capas, su posible naturaleza y el espesor en rellenos sanitarios (Suárez y Zúñiga, 2010). Sin embargo, al tratarse de perfiles unidimensionales (1D), requieren una gran cantidad de sondeos para construir un perfil representativo del subsuelo, lo cual no siempre capta adecuadamente la distribución heterogénea del terreno. En este sentido, la Tomografía de

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Resistividad Eléctrica (TRE) resulta más efectiva para identificar las variaciones laterales del subsuelo (Losinno et al., 2008).

En rellenos sanitarios, los valores altos de resistividad en los primeros metros suelen asociarse con el material de cobertura compactado, generalmente un tipo de suelo utilizado como capa de sellado o cobertura de los residuos, cuyo espesor puede variar. A mayores profundidades, se observa una disminución en la resistividad, lo que indica una mayor concentración de iones disueltos que favorecen el flujo eléctrico. Las zonas saturadas con lixiviados presentan los valores de resistividad más bajos, debido a la alta concentración de sales que incrementan la conductividad. Si el perfil geoelectrico tiene una longitud suficiente para alcanzar el material basal sobre el que reposan los residuos, este generalmente muestra valores de resistividad superiores a los de las capas intermedias (Losinno et al., 2008; Suárez y Zúñiga, 2010).

La línea sísmica y geoelectrica realizada en la Cárcava 1 evidencia con claridad la heterogeneidad propia de un vertedero en proceso de estabilización. La tomografía de resistividad muestra, en los primeros metros, valores que podrían corresponder al suelo de cobertura final, compuesto por una mezcla de arcilla compactada y suelo vegetal que ha perdido parte de su humedad debido al drenaje superficial y a la transpiración de la vegetación implantada. A profundidades intermedias, se observa una disminución en la resistividad, lo que contrasta con la velocidad de la onda P, que no presenta variaciones significativas. En cambio, la velocidad de la onda S muestra una disminución seguida de un aumento, lo cual podría indicar la presencia de un primer paquete de residuos parcialmente degradados, donde la infiltración de lixiviados y el reacomodamiento de partículas reducen la rigidez al corte y aumentan la conductividad eléctrica.

Aunque las velocidades de onda P se mantienen relativamente bajas, en comparación con materiales rocosos, estos valores son coherentes con el comportamiento típico de materiales poco

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

consolidados y de baja densidad en rellenos sanitarios. Las geometrías observadas en forma de cuñas o capas inclinadas, identificadas con mayor claridad en la sísmica de refracción y parcialmente coincidentes con los contrastes de resistividad, pueden asociarse a zonas con alto contenido de materia orgánica, aún en fase activa de biodegradación, saturadas por lixiviados y sometidas a procesos de generación de biogás. Esta combinación de alta humedad y baja rigidez convierte a dichas cuñas en zonas altamente compresibles y potencialmente inestables dentro del vertedero.

Hacia los flancos de los perfiles, donde la línea de adquisición fue de mayor longitud, se observan valores de resistividad más altos. Esto podría reflejar la presencia de celdas más antiguas y compactadas, o bien, los taludes laterales formados durante la operación del relleno. El análisis conjunto de los tres modelos geofísicos permite identificar niveles con cambios significativos en las propiedades del terreno, lo que posibilita una mejor definición del esquema estratigráfico para su aplicación en la simulación numérica. A diferencia de estudios previos como el de Leal y Becerra (2023), que consideraron modelos homogéneos, este análisis permite integrar un modelo bidimensional más realista que reproduce la geometría de la cuña blanda, explicando así los asentamientos diferenciales observados en campo.

Estos resultados destacan la presencia de suelos muy blandos, lo que implica riesgos asociados a amplificación sísmica y hundimientos por consolidación y creep. Las zonas laterales presentan mayor rigidez y podrían considerarse áreas más seguras para la instalación de estructuras ligeras. No obstante, dada la intención de desarrollar un parque fotovoltaico, fue necesario modelar el perfil completo en 2D para optimizar la localización de paneles solares y casetas de servicio.

7.2 Discusión parámetros geotécnicos

Los resultados integrados de los distintos parámetros geotécnicos permiten delinear una zonificación mecánica coherente con el comportamiento esperado de un relleno sanitario en evolución. Las variaciones texturales y de humedad inferidas, junto con los valores elevados del coeficiente de Poisson, sugieren la presencia de zonas con fracciones más deformables y saturadas, posiblemente asociadas a la acumulación localizada de lixiviados o a la disposición reciente de residuos. Estas transiciones marcan dominios con mayor susceptibilidad a asentamientos diferenciales. En contraste, los valores más bajos y la mayor rigidez asociada indican zonas potencialmente más estables, aptas para soportar cargas ligeras o instrumentación, aunque siempre bajo criterios de vigilancia técnica propios de un vertedero activo.

Valores bajos del coeficiente de Poisson se asocian a suelos inestables con baja resistencia a la deformación, comúnmente correspondientes a materiales arcilloso-limosos endurecidos. En contraste, valores más altos indican materiales con alta resistencia a la tensión, propios de suelos poco meteorizados o rocas con baja o nula compresibilidad (García, 2014).

La densidad, aunque con una variación modesta, revela la heterogeneidad vertical y lateral de los residuos, mientras que los módulos de Young y Bulk refuerzan la presencia de transiciones mecánicas significativas. En particular, el sustrato más basal actúa como capa fundacional rígida, probablemente arcillosa y compactada. Encima de esta capa, los residuos presentan valores menores, indicando mayor porosidad y humedad. La presencia de una banda con compresibilidad intermedia coincide con zonas de posible recompactación o acumulación de lixiviados, lo que refuerza la necesidad de una zonificación cuidadosa y controles de deformación.

En suelos sueltos, donde las tensiones cortantes son bajas, la presencia de esfuerzos de cizallamiento tiende a reducir la relación de Poisson, lo que indica una menor capacidad del

material para resistir deformaciones laterales. Estos bajos valores de resistencia al corte implican una mayor susceptibilidad a deslizamientos, ya que el comportamiento frente a fuerzas de cizalla está directamente relacionado con los mecanismos que los provocan (García, 2014). De igual forma, el módulo de Young (E) refleja la capacidad del suelo para recuperarse elásticamente ante una carga: los suelos sueltos presentan baja capacidad de recuperación, mientras que los suelos más compactos, al tener un módulo de Young más alto, resisten mayores cargas dentro del tramo elástico de deformación (González-Cueto et al., 2009). Por tanto, al igual que ocurre con el módulo de rigidez, zonas con bajo módulo de Young son indicativas de terrenos compuestos por material suelto, altamente susceptibles a erosión y deslizamientos (Márquez, 2023).

Los contrastes en la relación V_p/V_s concuerdan con los patrones descritos en los módulos dinámicos, valores altos indican materiales más compresibles, reforzando la hipótesis de zonas propensas a asentamientos diferenciales. Es importante señalar que no fue posible realizar un monitoreo a lo largo del tiempo. Esta limitación impide detectar variaciones temporales en los valores de resistividad y velocidades sísmicas, las cuales podrían evidenciar flujos de lixiviados o cambios en el terreno, para poder alertar sobre la necesidad de reforzar la red de captación y ventilación de biogás, a fin de evitar sobrepresiones y posibles fugas laterales. La integración de parámetros confirma la importancia de un monitoreo geotécnico continuo y la necesidad de aplicar criterios estrictos para la ubicación de estructuras o instrumentos sobre la superficie del relleno.

7.3 Discusión modelo asentamiento

Para reproducir el comportamiento deformacional del relleno sanitario se realizó la modelación esfuerzo-deformación-tiempo, calibrada con los datos de desplazamientos del ensayo piloto, facilitó simular la evolución de los asentamientos a horizontes de 1 día, 3 meses, 1 año y

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

10 años, evidenciando deformaciones acumuladas del orden de 100 centímetros. Los resultados muestran que el asentamiento no es homogéneo lateralmente o a lo largo del perfil simulado, presentándose mayores deformaciones hacia el sector derecho, lo que ratifica la heterogeneidad del terreno y corrobora los resultados obtenidos en la adquisición geofísica. Estos resultados refuerzan la importancia de emplear modelos que contemplen tanto la respuesta inmediata como la consolidación diferida para evaluar adecuadamente la estabilidad a largo plazo en terrenos de naturaleza heterogénea como los rellenos sanitarios. En este tipo de entornos, el terreno presenta variaciones laterales y en profundidad de sus propiedades físicas, como se evidenció en la Carcava 1, donde se identificaron zonas con posible presencia de lixiviados y acumulación de gas.

Para la caracterización integral de rellenos sanitarios, es recomendable complementar los métodos directos con técnicas geofísicas no destructivas, que permiten explorar el subsuelo de forma rápida y económica. Métodos como el georradar, la prospección magnética, ensayos sísmicos y la tomografía de resistividad eléctrica son útiles para delimitar bordes, detectar objetos enterrados, identificar cuerpos metálicos y localizar focos de contaminación. Su integración mejora la comprensión de la estructura del vertedero y permite realizar un seguimiento temporal, facilitando la toma de decisiones para su gestión y saneamiento (Busquet et al., 1996; Torres et al., 2017).

8 Conclusiones y recomendaciones

A partir de la caracterización geofísica y los ensayos de carga realizados, se concluye que el terreno clausurado del relleno sanitario El Carrasco presenta una marcada heterogeneidad vertical y lateral, asociada a la naturaleza variable de los residuos, la presencia de zonas con acumulación de lixiviados y procesos diferenciales de compactación. Se recomienda establecer zonas diferenciadas de uso sobre la superficie del relleno, limitando la carga en sectores con mayor compresibilidad identificados mediante la integración de parámetros geofísicos y geotécnicos.

El ensayo de carga piloto, mediante la aplicación progresiva de cargas, permitió evaluar el comportamiento real del terreno en la Cárcava 1. Se observaron asentamientos inmediatos tras cada incremento de carga, seguidos de una fase de estabilización progresiva, lo cual es característico de materiales sueltos y heterogéneos como los presentes en rellenos sanitarios. Los puntos de medición mostraron respuestas diferenciadas; en el Punto 1 se registró un asentamiento 3 mm mayor durante el primer día, coincidiendo con zonas de menor rigidez y bajas velocidades sísmicas según los estudios geofísicos. Esta es una característica típica de materiales blandos, los cuales se caracterizan por presentar una rigidez reducida. Las curvas de asentamiento obtenidas a lo largo del tiempo fueron fundamentales para calibrar el modelo numérico y evidencian que, aunque algunas zonas presentan capacidad portante limitada, otras son aptas para soportar cargas ligeras, siempre que se garantice una adecuada zonificación y monitoreo continuo del terreno.

Los valores elevados del coeficiente de Poisson ($\nu > 0,44$), la disminución de los módulos dinámicos (Young y Bulk) y las relaciones V_p/V_s altas en sectores específicos del perfil, indican dominios con materiales altamente deformables y saturados, susceptibles a asentamientos diferenciales. En contraste, zonas con valores más bajos de ν ($\sim 0,43$) y mayores módulos elásticos

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

muestran mejor comportamiento mecánico relativo, aunque con restricciones propias de un terreno en proceso de estabilización. Por lo que es ideal implementar un sistema de monitoreo geotécnico (asentamientos, humedad, presión de poros) en las áreas más susceptibles.

El análisis de los modelos de asentamiento aplicables a residuos sólidos urbanos evidencia la evolución en la comprensión de los mecanismos que intervienen en este proceso. Mientras que los modelos empíricos como el hiperbólico permiten ajustar datos observados con relativa simplicidad, su capacidad para representar la complejidad de los fenómenos físicos involucrados es limitada. Por su parte, los modelos reológicos incorporan de manera más realista los procesos de deformación primaria y secundaria, incluyendo los efectos mecánicos y biológicos. La elección del modelo debe responder no solo al ajuste con los datos, sino también a la capacidad de interpretar y anticipar la dinámica de los asentamientos en contextos reales de gestión de residuos.

El ensayo de carga piloto evidenció tanto asentamientos inmediatos como diferidos en el tiempo, confirmando el comportamiento viscoelástico y de consolidación secundaria de los residuos. Esta información fue clave para calibrar un modelo teórico de esfuerzo-deformación-tiempo que permite proyectar la evolución futura de los asentamientos y evaluar riesgos asociados a la instalación de estructuras o instrumentación sobre el área clausurada. Aun así, es necesario recalibrar el modelo teórico de evolución de asentamientos con base en nueva información proveniente del monitoreo, para mejorar la capacidad predictiva y la toma de decisiones sobre el uso futuro del sitio.

El análisis de los desplazamientos en Y muestra que los asentamientos en el relleno sanitario aumentan progresivamente con el tiempo, pasando de valores mínimos en los primeros días a deformaciones más significativas y distribuidas tras varios años. A los 10 años, los asentamientos alcanzan valores cercanos a los 100 cm a una profundidad de 10 metros, lo que

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

refleja la influencia combinada de la consolidación secundaria y los procesos de descomposición de residuos. Estos resultados destacan la importancia de considerar los efectos de largo plazo en la evaluación de la estabilidad y comportamiento de los rellenos.

Se recomienda realizar campañas geofísicas adicionales con mayor cobertura espacial y densidad de puntos de medición, incorporando líneas perpendiculares y extendidas fuera de la zona de estudio actual. Esto permitirá refinar la zonificación geotécnica del relleno, identificar con mayor resolución las zonas de acumulación de lixiviados o compactación diferencial, y fortalecer la calibración del modelo teórico de asentamientos.

9 Referencias Bibliográficas

- ASTM, I. (2011). Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation. ASTM International.
- Alcaldía de Bucaramanga (2022). Así opera El Carrasco actualmente. <https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/asi-opera-el-carrasco-actualmente/>
- Briaud, J. (2001). Introduction to soil moduli. department of civil engineering, texas a & m university, college station, Texas, 77843-3136, USA. Geotechnical News, page 8.
- Busquet, E., Casas, A., Pinto, V., Rivero, L. y Sabadía, J. (1996). Geofísica ambiental: técnicas no destructivas para el reconocimiento de zonas contaminadas por vertidos. Acta Geologica Hispanica. V. 30, n 1-3, p. 73-82.
- Code Bright. (2023). Universitat Politècnica de Catalunya. https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright
- Code Bright 2022 User's guide. (2022), Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech.
- Díaz, L. y Peñarada, L. (2021). Evaluación de metodologías disponibles para el cálculo de capacidad portante y asentamientos en rellenos sanitarios: Caso de estudio para el proyecto de un parque solar en la cárcava 1 del relleno sanitario El Carrasco de la ciudad de Bucaramanga (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Dobrin, M. B. and Savit, C. H. (1960). Introduction to geophysical prospecting, volume 4. McGraw-hill New York.
- Everett, M. E. (2013). Near-surface applied geophysics. Cambridge University Press.

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

- Edgers, L., Noble, J., & Williams, E. (1992). A biologic model for long term settlement in landfills. In Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology (pp. 177–184).
- Edil, T.B., Ranguette, V.J., Wuellner, W. . (1990). Settlement of municipal refuse. In: Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice: ASTM STP 1070. American Society of Testing and Materials, 225–239.
- El-fadel, M., Shazbak, S., Saliby, E., & Leckie, J. (1999). Comparative assessment of settlement models for municipal solid waste landfill applications. *Waste Management and Research*, 17(5), 347–368. <http://doi.org/10.1034/j.1399-3070.1999.00059.x>
- Franco, L. J., Meza, M. A. y Almeida, J. E. (2018). Situación de la disposición final de residuos sólidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga: caso relleno sanitario El Carrasco (revisión). *Avances Investigación En Ingenierías*, 15(01), 180-193. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4735>
- García, A. H. (2014). Elastoplasticidad de un suelo franco arenoso de sabana. *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 26(2):153–167.
- Gazetas, G. (1991). Foundation vibrations, foundation engineering handbook. New York-Van Nostrand Reinhold, pages 553–593.
- Geotomo, S. (2010). Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Geometrics.
- Gibson, R. E., & Lo, K. Y. (1961). A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression.
- Griffiths, D. and Barker, R. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of applied Geophysics*, 29(3-4):211–226.

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

- Khalil, M. H. and Hanafy, S. M. (2008). Engineering applications of seismic refraction method: A field example at wadi wardan, northeast gulf of suez, sinai, egypt. *Journal of Applied Geophysics*, 65(3-4):132–141.
- Kolsch, F., 1997, "Waste Mechanics and Landfill Geotechnique"; TU Braunschweig, Germany.
- Ling, H. I., Leshchinsky, D., Mohri, Y., & Kawabata, T. (1998). Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(1), 21–28. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:1\(21\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:1(21))
- Lowrie, W. and Fichtner, A. (2019). *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press.
- Losinno, B., Sainato, C., Malleville, H. y Calindo, G. (2008). Tomografía de resistividad eléctrica aplicada a la caracterización de sitios contaminados en Tambos. *SUELO (ARGENTINA)* 26(2): 141-152.
- Luna, R. and Jadi, H. (2000). Determination of dynamic soil properties using geophysical methods. *Proceedings of the first international conference on the application of geophysical and NDT methodologies to transportation facilities and infrastructure*, St. Louis, MO, pages 1–15.
- Márquez, L. (2023). Caracterización geotécnica del subsuelo en los municipios de San Joaquín y Mogotes Santander usando métodos geofísicos. Trabajo de Grado para optar al título de Magíster en Geofísica. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/14668>
- Mora, J. (2019). Aproximación a los problemas ambientales que se presentan en el relleno sanitario “El Carrasco, en Bucaramanga” (tesis de pregrado). Universidad Pontificia Javeriana, Bogotá, Colombia.

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

- Mullins, C., MacLeod, D., Northcote, K., Tisdall, J., and Young, I. (1990). Hardsetting soils: behavior, occurrence, and management. In *Advances in soil science*, pages 37–108. Springer.
- Naranjo Aguay, H. and Dranichnikov, T. (2013). Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional. Abya-Yala/UPS.
- Nelson, R. G., Summers, J. D., and Solie, J. B. (1997). Frequency and moisture content effects on the visco-elastic characteristics of soil. *Soil technology*, 10(1):21–33.
- Leal, O. y Becerra, H. (2023). Determinación de asentamientos en el relleno sanitario “El Carrasco” de la ciudad de Bucaramanga. Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander.
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/14298>
- Loke, M. H. (1999). *A Practical Guide to 2D and 3D Surveys. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies.*
- Ordóñez, C. A. (2007). Calibración de modelos geotécnicos para simular el comportamiento de los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera mediante registros de instrumentación. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3):800–808.
- Park, H. I., & Lee, S. . (1997). Long-term settlement behavior of landfills with refuse decomposition. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 24(4), 159–165.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., and Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (masw) active and passive methods. *The Leading Edge*, 26(1):60–64.

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

- Park, H. I., Park, B., Lee, S. R., & Hwang, D. (2007). Parameter Evaluation and Performance Comparison of MSW Settlement Prediction Models in Various Landfill Types. *Journal of Environmental Engineering*, 133(January), 64–72. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2007\)133:1\(64\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2007)133:1(64))
- Quirós, M. F. (2019). Análisis geofísico para determinar la posible existencia de lixiviados en el costado occidental del relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga (tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/14095>
- Raper, R. L., Johnson, C. E., and Bailey, A. C. (1994). Coupling normal and shearing stresses to use in finite element analysis of soil compaction. *Transactions of the ASAE*, 37(5):1417–1422.
- Ren, Y., Zhang, Z. y Huang, M. (2022). A review on settlement models of municipal solid waste landfills. *Waste Management*, 149, 79-95. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.019>
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- Rivera, I. (2012). *Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios (tesis de pregrado)*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Sánchez Duarte, J. A., Contreras, M. A., y Torres, J. A. (2020). Caracterización Geotécnica Del Subsuelo En El Relleno Sanitario Regional “La Cortada”, Pamplona (Norte De Santander) A Partir De Datos Geofísicos. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2.
- Sánchez Pinto, J. K. (2020). *Determinación del espesor del suelo inconsolidado en el abanico aluvial en Mogotes Santander utilizando sísmica de refracción*. Trabajo de grado para optar al título de magíster en geofísica, Universidad Industrial de Santander.

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

- Scapozza, C., y Laigre, L. (2014). The contribution of Electrical Resistivity Tomography (ERT) in Alpine dynamics geomorphology: case studies from the Swiss Alps. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 20(1), 27-42.
- Sheehan, J. R., Doll, W. E., and Mandell, W. (2004). Comparison of MASW and refraction tomography. European Association of Geoscientists and Engineers.
- Simões, G. F., & Catapreta, C. A. A. (2013). Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 33(2), 420–30. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.001>
- Sivakumar, G. L., Reddy, K. R., Chouskey, S. K. y Kulkarni, H. S. (2010). Prediction of Long-Term Municipal Solid Waste Landfill Settlement Using Constitutive Model. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 14(2), 139-150. 10.1061/(ASCE)HZ.1944-8376.0000024
- Smith, G. N. (1982). *Elements of soil mechanics for civil and mining engineers*. Granada Publishing Limited.
- Sowers, G. F. (1975). Settlement of waste disposal fills. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 12(4), 57–58. [http://doi.org/10.1016/0148-9062\(75\)90051-0](http://doi.org/10.1016/0148-9062(75)90051-0)
- Stein, S. and Wysession, M. (2009). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. John Wiley & Sons.
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos: análisis geotécnico*. Colombia. Editorial Universidad Industrial de Santander, UIS, 340:341pp.
- Suárez, J. y Zúñiga, H. (2010). Detección de capas de desechos con métodos geoelectricos: caso relleno sanitario Río Azul, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 49: 129-139.

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

- Telford, W. M., Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. E., and Sheriff, R. (1990). Applied geophysics, volume 1. Cambridge university press.
- Torrado, L. M y Rondón, J. A. (s.f.). Diseño de vertederos y rellenos sanitarios. Ingeas. <https://www.ingeassas.com/diapositivas/RELLENOS-SANITARIOS-CASO-CARRASCO.pdf>
- Torres, J., Cantillo, J., Contreras, M. (2017). Métodos geofísicos aplicados a la de celdas activas y clausuradas del relleno sanitario "La Cortada" (Norte de Santander). Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo. Volumen 1.
- Vargas Cáceres, M. I. (2021). Comparación de la anisotropía de la resistividad del subsuelo fracturado en zonas aledañas a diferentes tipos de estructuras, e implicaciones hidrogeológicas para un área rural del municipio de Los Santos, Santander. Trabajo de grado para optar al título de magíster en geofísica, Universidad Industrial de Santander.
- Wall, D. K., & Zeiss, C. (1995). Municipal Landfill Biodegradation and Settlement. Journal of Environmental Engineering, 121(3), 214–224. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1995\)121:3\(214\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1995)121:3(214))
- Xia, J. (2014). Estimation of near-surface shear-wave velocities and quality factors using multichannel analysis of surface-wave methods. Journal of applied geophysics, 103:140–151.
- Yamakawa, Y., Kosugi, K., Masaoka, N., Sumida, J., Tani, M., and Mizuyama, T. (2012). Combined geophysical methods for detecting soil thickness distribution on a weathered granitic hillslope. Geomorphology, 145:56–69.

Estabilidad de un parque solar fotovoltaico en el Carrasco de Bucaramanga

Yepes García, J. A. (2015). Ajuste de un modelo para estimar asentamientos en el relleno sanitario

La Pradera. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en ingeniería geotécnica, Universidad Nacional de Colombia.

Yepes, J. y Villarraga, M. (2018). Análisis de los asentamientos en los rellenos sanitarios La

Pradera y Curva de Rodas. Boletín de Ciencias de la Tierra, 43, 24-33.

<https://doi.org/10.15446/rbct.n43.61433>